

УДК 574.539.1.04:628.3.034.2

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОЧИЩЕННЯ ШАХТНИХ ВОД НА ПРИКЛАДІ ІНГУЛЬСЬКОЇ ШАХТИ ДП «СХІД ГЗК»

Данилов С. В., Забулонов Ю. Л., Кадошніков В. М., Одукалець Л. А.

Данилов С. В. аспірант ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» svdanilov@yahoo.com

Забулонов Ю. Л. чл. - кор. НАН України, докт. тех. наук, проф., зав. від. ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» zabulonov@mail.ru

Кадошніков В. М. н. с. ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» vm.kadoshnikov@gmail.com

Одукалець Л. А. н. с. ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України» laoduk@i.ua

У роботі описаний метод підвищення ефективності очищення шахтних вод і спосіб його реалізації. Комбіноване використання електродіалізу і методу співсаджень полягає в тому, що спочатку відбувається співсадження урану на частинках сульфату кальцію, а наступне застосування електродіалізу після процесу коагуляції наночастинок дозволяє отримати очищення стоку з концентрацією урану не більше 0,01 мг/дм³. Розглянуто можливість вилучення не тільки урану, але і його супутників – радію, полонію тощо. У статті наведено результати досліджень із застосуванням установки очищення шахтних вод Інгульської шахти ДП «Схід ГЗК», зокрема результати лабораторних вимірювань складу шахтних вод, що надходять на установку, складу шахтних вод, що пройшли процес очищення і скидаються у навколишнє середовище та результати тестових експериментів із знесолення розчину з використанням лабораторної установки EDL-10. Доведена перспективність використання електродіалізу при змінному електричному струмі. При протіканні змінного струму в електрохімічній системі створюються умови для здійснення більш широкого класу різних електрохімічних реакцій в розчинах, на електродах і міжфазній межі електрод–електроліт, електроліт–мембрана. Перевагою застосування нестационарного режиму при електродіалізі є його низька чутливість до концентрації іонів водню (рН), що дозволяє працювати як з сильно кислими, так і з сильно лужними розчинами. Підтверджено обмеження застосування електродіалізу, що пов'язано з неможливістю вилучення незаряджених компонентів високоінергалізованих розчинів, якщо такі будуть присутні.

Ключові слова: електродіаліз, шахтні води, очищення, мембрани, лабораторна установка, знесолення, пом'якшення, рН.

Вступ

При підземній розробці уранових родовищ умовно чисті води не відводяться, відбувається їх змішування з забрудненими шахтними водами та розповсюдження цих водопотоків по гірничих виробках, що призводить до зашламовування водостічних каналів і водозбірників, підтоплення гірничих виробок. Таким чином це погіршує умови утримання гірничих виробок і виводить з ладу шахтний транспорт. Забруднюється літосфера, підземні водні горизонти. Шахтні води, які проникають у водоносні горизонти через зони техногенного зрушення гірських порід (при експлуатації шахт), провали над виходами вугільних пластів, відвали шахт – потенційні джерела забруднення підземних вод.

Об'єми шахтних вод, що скидаються в річки і водойми, можуть бути порівняні з обсягами природного стоку малих річок і справляють на їх водний баланс величезний негативний вплив.

Загальний обсяг забруднених стоків, що скидаються по гірничо-видобувній галузі України, становить понад 900 млн. м³/рік. Сумарний обсяг шахтних вод на Інгульській шахті ДП "Схід ГЗК" в даний час з урахуванням відпрацювання Мічурінського і Центрального родовищ складає 700–800 м³/годину. При відпрацюванні запасів нижніх горизонтів приток шахтних вод Мічурінського родовища збільшиться до 400 м³/годину, при цьому загальна потужність притоку вод складе 1100–1200 м³/годину, що вимагає збільшення продуктивності установки очищення шахтних вод (УОШВ). Проектна продуктивність УОШВ після

реконструкції складе – 900 м³/година (18000 м³/доба; 6,57 млн. м³/рік). З наведених вище причин стає зрозуміло, яке велике значення для екологічної безпеки регіону має пом'якшення та знесолення шахтних вод.

Проблематика очищення шахтних вод існувала завжди, але вона має властивість наростати з розвитком підприємства, збільшенням його видобудку, розробкою нових шарів породи, утворенням все більш розгалужених підземних мереж, прогресуючим накопиченням відвалів породи, і логічним збільшенням об'єму шахтних вод, що потрапляють до навколишнього середовища.

Мета роботи: Оптимізація методів очищення шахтних вод, розробка устаткування і складових заходів щодо підвищення ефективності очищення на прикладі Інгульської шахти ДП «Схід ГЗК»

Результати дослідження та їх обговорення

Аналіз складу шахтних вод ДП «Схід ГЗК», наведеного у таблиці 1, показує, що такі води не можуть бути скинуті у відкриту водойму, оскільки вони не відповідають вимогам, що пред'являються для скидання в р. Інгuleць, по ряду параметрів. У першу чергу, це пов'язано перевищенням гранично допустимого скиду (ГДС) шахтними водами за радіонуклідним складом. Зокрема, вміст урану за період січень-вересень 2012 становив близько 0,5 мг/л, в той час як згідно вимог нормативних документів вміст останнього не повинен перевищувати 0,05 мг/л.

Таблиця 1. Склад шахтних вод, що надходять на установку очищення

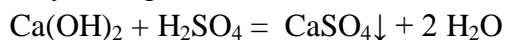
№ п/п	Показники складу	Од. вим.	ГДС	середнє значення (максимальне значення)								
				січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень
1	рН	од. рН	6,5-8,5	7,9 (7,9)	8 (8,1)	8 (8,1)	7,9 (8)	7,9 (8)	7,9 (8,1)	7,7 (7,9)	7,6 (7,9)	7,2 (8)
2	Завислі речовини	мг/дм ³	19,8	66,2 (123)	95 (162)	90 (138)	53,6 (84,8)	55,1 (86,3)	52,1 (83,2)	421,7 (2430)	756,9 (5767)	397,7 (1345)
3	Сульфати	мг/дм ³	501,4	704,3 (752)	646 (697)	616,3 (659)	631 (667)	647,5 (650)	613,7 (680)	750,7 (868)	696,3 (714)	1716,3 (3411)
4	Хлориди	мг/дм ³	561	686,7 (774)	522 (730)	424,7 (577)	508 (668)	372 (403)	499,7 (630)	631,7 (747)	619 (796)	1059 (1815)
5	Мінералізація	мг/дм ³	2216,7	2658 (2880)	2268 (2646)	2032 (2106)	2418 (2632)	2154 (2354)	2424,7 (3198)	2644 (2870)	2564,7 (2950)	4284 (7214)
6	Амонію іон	мг/дм ³	0,8	0,8 (1,3)	1,56 (2,4)	1,06 (1,6)	1,2 (1,8)	0,8	0,5 (0,6)	1 (1,3)	0,6 (0,82)	16,6 (46,2)
7	Нітриди	мг/дм ³	0,4	0,9 (1,6)	0,7 (1,1)	0,8 (0,9)	0,9 (1)	0,8 (0,9)	0,9 (1,7)	1,3 (2,4)	1,2 (1,4)	1,5 (1)
8	Нітрати	мг/дм ³	30,6	25,1 (28,8)	30,7 (38,6)	26,2 (28,3)	31,1 (32,2)	27,6 (31,9)	27,4 (32,2)	29,9 (36)	25,3 (27,5)	26,6 (40,1)
9	Залізо заг.	мг/дм ³	0,3	3,4 (5,1)	5,2 (6,9)	3,6 (4,8)	1,7 (2,7)	4,7 (6,7)	2 (2,6)	5,8 (8,2)	5,5 (10,9)	22,5 (41,5)
10	Фосфати /PO43-/	мг/дм ³	0,4	0,1 (0,2)	0,1	0,1 (0,3)	0,1 (0,1)	0,1	0,1 (0,1)	0,1 (0,1)	0,1 (0,1)	0,2 (0,3)
11	Кальцій	мг/дм ³	270,2	329,3 (411)	241,3 (303)	217,7 (236)	250 (308)	227,5 (239)	225 (265)	277,3 (298)	273,7 (323)	362,7 (481)
12	Уран	мг/дм ³		0,6 (0,8)	0,5 (0,5)	0,4 (0,5)	0,5 (1)	0,4 (0,6)	0,4 (0,5)	0,7 (1,4)	0,4 (0,7)	0,4 (0,6)

Крім радіонуклідів шахтні води містять значну кількість завислих речовин, вміст яких, згідно ГДС, не повинен перевищувати 19,8 мг/л. Реально ж, шахтні води містять від 60 до 100 мг/л завислих речовин.

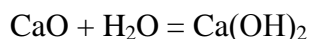
Для шахтних вод Інгульської шахти ДП «Схід ГЗК» характерно перевищення ГДС такими елементами як сульфати, вміст яких становить 780 мг/л при нормативі 501,4 мг/л; вміст нітритів становить 1 мг/л при нормативі 0,38 мг/л; вміст заліза загального – 6 мг/л при нормативі 0,26 мг/л.

Враховуючи реальні показники складу води і вимоги нормативної документації, якою керується підприємство «Схід ГЗК» при скиданні шахтних вод в р. Інгулець, на підприємстві була застосована УОШВ.

В основу роботи цієї установки покладено процеси співосадження радіоізотопів при виділенні і осажденні іонів Ca^{2+} , Mg^{2+} . Для цієї мети використовується реакція утворення нерозчинного сульфату кальцію, одержуваного при взаємодії гідроксиду кальцію з розчином сірчаної кислоти. При цьому реалізується реакція:



Для отримання суспензії гідроксиду кальцію (вапняне молоко), в запропонованій схемі очищення шахтних вод передбачається процес гасіння вапна водою, що протікає по наступній реакції:



Утворені в процесі взаємодії гідроксиду кальцію і сірчаної кислоти кристали сульфату кальцію (гіпсу) виступають в якості сорбенту для радіонуклідів. Крім того, при утворенні сульфату кальцію під дією сірчаної кислоти значні кількості відносно розчинних карбонатів і гідрокарбонатів перетворюються в низько розчинний сульфат по реакції



Аналогічним чином трансформуються карбонати і гідрокарбонати магнію і заліза. Перетворення карбонатів і гідрокарбонатів в сульфати, які мають низьку розчинність, при розділенні твердої і рідкої фаз призводить до незначного зменшення концентрації солей у водах, що очищуються.

У процесі співосадження утворюється значна кількість нерозчинних речовин, для відділення яких від рідкої фази використовується метод відстоювання. Тим не менше, навіть при десятигодинному відстоюванні утворюється значна кількість частинок, які перешкоджають процесу розділення твердої і рідкої фаз методом фільтрування. Для осаження утвореної суспензії передбачений процес освітління, що полягає в додаванні в неосвітлений фільтрат розрахункової кількості поліакриламід (ПАА). При взаємодії ПАА з твердими частинками суспензії утворюється коагулят, який у подальшому, методом фільтрування на дисковому фільтрі, відділяється від рідкої фази. Отриманий фільтрат містить до 10 мг/л твердих речовин.

Отриманий фільтрат, після проведення коригування і доведенні його рН до 8-8,5 скидається в навколишнє середовище. Принципова і технологічна схеми оброблення шахтних вод з метою приведення їх хімічного, радіонуклідного і мінерального складу у відповідності до вимог ГДС, наведені на рис. 1 і рис. 2.

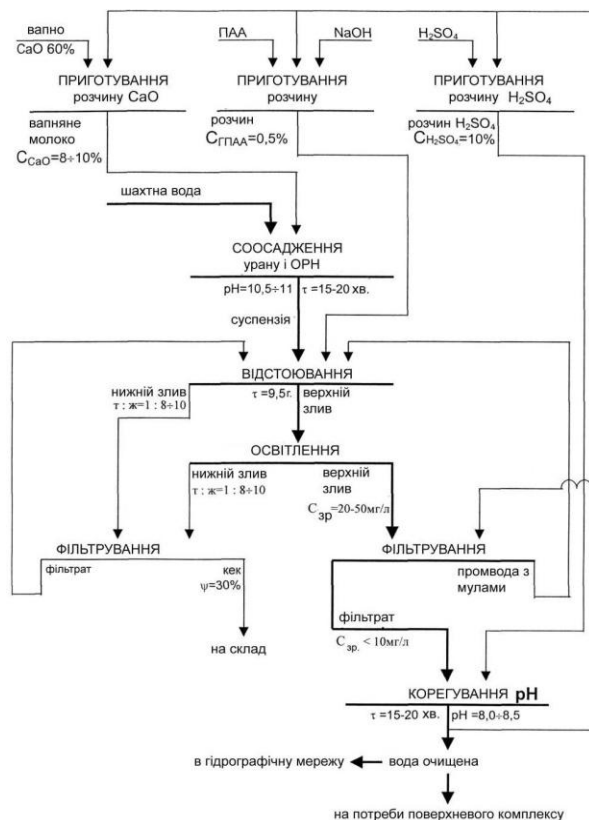


Рис. 1. Принципова схема очищення шахтних вод на Інгульській шахті ДП «СхідГЗК»

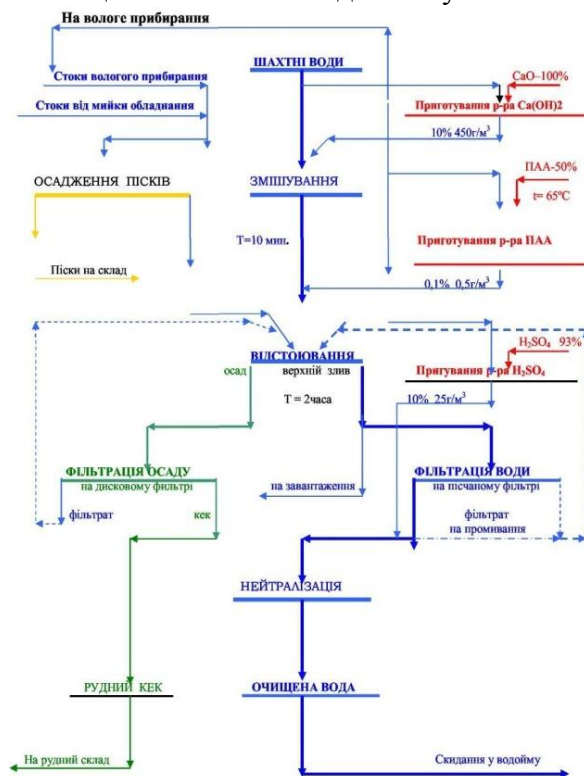


Рис. 2. Технологічна схема очищення шахтних вод на Інгульській шахті ДП «Схід ГЗК»»

Склад шахтних вод Інгульської шахти ДП «Схід ГЗК», що пройшли процес очищення на УОШВ і скидаються у навколишнє середовище, наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Склад шахтних вод, що пройшли процес очищення на УОШВ Інгульської шахти ДП «Схід ГЗК» і скидаються у навколишнє середовище

№ п/п	Показники складу	Од. вим.	ГДС	після очищення {середнє значення(максимальне значення)}									
				січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	
1	рН	од. рН	6,5-8,5	7,2 (7,9)	7,9 (8,8)	7,3 (8,5)	7,4 (7,9)	7,3 (7,9)	7,4 (8,3)	7,6 (8,5)	6,9 (7,3)	7,9 (11,5)	
2	Завислі речовини	мг/дм ³	19,8	16,76 (19,4)	20,98 (27,2)	18,78 (22,1)	17,76 (19,7)	21,11 (46,5)	18,96 (23,5)	48,48 (293)	18,6 (19,7)	32,64 (108)	
3	Сульфати	мг/дм ³	501,4	691,7 (731)	672,3 (698)	815 (829)	728,3 (836)	647,7 (694)	884 (985)	914,7 (996)	996,3 (1085)	920 (991)	
4	Хлориди	мг/дм ³	561	554 (591)	600,8 (688)	574,7 (599)	573,7 (647)	546,7 (556)	723 (737)	654,7 (761)	777,7 (964)	670,3 (827)	
5	Мінералізація	мг/дм ³	2216,7	2259,3 (2330)	2400,5 (2600)	2364,7 (2506)	2178,7 (2486)	2218 (2336)	2823,3 (3198)	2766 (3220)	3187,3 (3794)	2955,3 (3292)	
6	Амонію іон	мг/дм ³	0,8	0,6 (0,8)	1,7 (2,2)	1,5 (1,7)	1,3 (2,5)	0,8 (0,9)	0,9 (1)	2,6 (5,9)	0,8 (1)	2,8 (4,3)	
7	Нітриди	мг/дм ³	0,4	0,5 (0,8)	0,8 (0,9)	1 (1)	1,4 (1,8)	0,8 (1)	3 (3,9)	2,2 (2,9)	1,5 (2)	2,4 (2,7)	
8	Нітрати	мг/дм ³	30,6	19,1 (22)	25,1 (30)	22,7 (25,6)	27,1 (29)	22,6 (25)	30,5 (38)	28,3 (39,2)	21,5 (24,1)	25,4 (33)	
9	Залізо заг.	мг/дм ³	0,3	0,1 (0,1)	0,7 (1)	0,2 (0,3)	0,2 (0,3)	0,3 (0,6)	0,1 (0,2)	0,3 (0,4)	0,2 (0,5)	0,5 (1,4)	
10	Фосфати	мг/дм ³	0,4	0,1 (0,1)	0,1 (0,1)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	
11	Кальцій	мг/дм ³	270,2	282 (299)	264,3 (277)	307,3 (344)	258 (345)	240,3 (267)	317,7 (337)	331,7 (440)	359,7 (507)	389 (429)	
12	Уран	мг/дм ³		0,1 (0,3)	0,4 (0,5)	0,04 (0,1)	0,1 (0,2)	0,1 (0,3)	0,04 (0,1)	0,05 (0,1)	0,04 (0,1)	0,03 (0,1)	

Аналіз отриманих даних однозначно свідчить, що склад шахтних вод, що пройшли процес очищення на УОШВ Інгульської шахти ДП "Схід ГЗК" і скидаються у навколишнє середовище, за своїм хімічним складом, рівнем загальної мінералізації і кількістю мікророзчинів у ряді випадків за деякими показниками не відповідає вимогам, встановленим нормативною документацією. Серед розчинних компонентів перевищення ГДС характерно за такими показниками, як сульфати та хлориди, а концентрація інших елементів сягає верхньої межі ГДС.

Таким чином, для очищення шахтних вод Інгульської шахти ДП «Схід ГЗК» існуючих схем і методів очищення вкрай недостатньо і нами запропоновано застосовувати, як найбільш доцільний, метод електродіалізного очищення.

Вибір технології знесолення шахтних вод

При виборі тієї чи іншої технології знесолення часто виникає питання, яку технологію обрати. Найбільшими конкурентами при знесоленні значних об'ємів вод високого ступеню солоності є два мембранних методи: зворотній осмос (процес мембранного розділення рідких розчинів шляхом проникнення через напівпроникну мембрану розчинника під дією тиску застосованого до розчину, що перевищує його осмотичний тиск) і електродіаліз (процес проходження іонів розчиненої речовини через мембрану під дією електричного поля у вигляді градієнта електричного потенціалу), які поперемінно конкурують між собою за право домінувати.

Хоча теоретично при обох процесах потрібна співставна кількість енергії, необоротне розсіювання енергії істотно відрізняється. Необоротні втрати енергії при зворотньому осмосі викликані гідравлічним опірм мембрани потоку води і, таким чином, залежить від концентрації солі у розчині. У електродіалізі необоротні втрати енергії викликані електричним опором потоку іонів через мембрану. Для подачі розчинів з низькою концентрацією солей потреби в енергії, як правило, нижче у випадку використання електродіалізу ніж при зворотньому осмосі, з реверсним подаванням сильно концентрованих розчинів.

Існують критерії, зручні для порівняння, якими можна оперувати. Домінуючими, за якими слід проводити зіставлення ефективності зворотного осмосу і електродіалізу, є три фактори:

- попередня підготовка води;
- частота заміни мембран;
- енергоємність процесу.

В даному випадку порівнянням вартості самих установок, які варіюють у різних країнах (розкид цін до 30%), ми навмисне нехтуємо.

У таблиці 3 наведено порівняльну характеристику двох мембранних процесів: електродіалізу та зворотного осмосу.

Таблиця 3. Порівняльна характеристика процесів електродіалізу та зворотного осмосу

	Електродіаліз	Зворотний осмос
1.	Мембрани майже не чутливі до компонентів і фізико-хімічних параметрів середовища, у якому експлуатується	Мембрани мають високу чутливість до різного роду домішок органічного та неорганічного характеру
2.	Процес не вимагає застосування схем передпідготовки води	Процес вимагає застосування розвинених схем передпідготовки води (досягають 8 стадій)
3.	Для зворотного осмосу, і для електродіалізу (але у значно меньшому ступеню, ніж для зв. осмосу) найбільш небезпечними є солі жорсткості, особливо кальцієва жорсткість*	
4.	Система реверсного електродіалізу може працювати при залишковій концентрації активного хлору до 1 мг/дм ³	Зворотний осмос потребує дехлорування, щоб захистити мембрану від деградації через окислення вільним хлором
5.	Мінімальне біологічне забруднення мембрани, що по'язано зі здатністю реверсного електродіалізу працювати у присутності невеликих концентрацій активного хлору	Зворотний осмос потребує дехлорування, щоб захистити мембрану від деградації через окислення вільним хлором, а отже вірогідність біологічного забруднення мембрани зростає
6.	Система реверсного електродіалізу дозволяє відновлювати воду до 95 %	Для системи зворотного осмосу ступінь відновлення води знаходиться в межах 65-75 %
7.	Мембрана реверсного електродіалізу нечутлива до впливу бактерій і впливу високих температур	При зворотному осмосі потрібні спеціальні розчини
8.	Мембрана реверсного електродіалізу не потребує спеціальних умов зберігання	При зворотному осмосі потрібен контроль температури при зберіганні мембрани
9.	Мембрана**, що використовується в технології реверсного електродіалізу, може експлуатуватися 2- 10 років, залежно від складу середовища,	Мембрана зворотного осмосу може використовуватися не більше 1-3-х років через чутливість до факторів процесу, зокрема середовища, в якому експлуатується.
10.	Мембрана реверсного електродіалізу може бути очищена кислотою, розсоллом, каустичною содою	Мембрана зворотного осмосу вимагає спеціальних дорогих очищаючих хімікатів (хелатів)
11.	Вода, піддана процесу електродіалізу, після змішування вмісту катодної та анодної камер, не потребує додаткової обробки	В результаті зворотного осмосу стічна вода містить дуже велику кількість кислоти, що вимагає її нейтралізації каустичною содою чи вапном
12.	Очищення електродіалізних пакетів не зустрічає будь-яких труднощів	Розбирання заводських блоків апаратів зворотного осмосу, що мають спіральну конфігурацію, найчастіше неможлива
13.	Мембрани для електродіалізу грубі, композитні, надзвичайно міцні	Мембрани зворотного осмосу ізотропні (з однорідною структурою) або анізотропні (з поверхневим тонкодисперсним шаром) тонкі
14.	Мембрани після висихання відновлюють свої властивості, що надзвичайно важливо в країнах з жарким кліматом	Мембрани надзвичайно чутливі до пересихання і реально зберігають свої якості від 6 місяців до року
15.	Мембрани легко регенеруються розчинами кислот	Мембрани не підлягають регенеруванню
16.	Повна витрата електроенергії на процес електродіалізу (з урахуванням енергії перекачувальних насосів) варіює в межах 1,5-2,5 кВт/год/м ³	Для води з масовою часткою солей 3,5-4,0 % робочий тиск в установках зі знесолення повинен бути 7-8 МПа. І, незважаючи на високу селективність мембран, процес проводять у дві стадії.
17.	На видалення 1 кг солі необхідно до 2 кВт/год електроенергії	Для знесолення 1 м ³ такої води необхідно до 10 кВт/год електроенергії

* Причому, ці переваги можна збільшити, перейшовши з мембран, що мають стирол-дівінілбензолъну основу на акрилову.

** Для зниження вмісту солей кальцію не існує ефективних методів.

Технічна складова установки EDL-10

Для перевірки наших припущень стосовно доцільності використання для підвищення ефективності очищення шахтних вод ДП «Схід ГЗК» описаних методів була розроблена лабораторна установка EDL-10.

Основною її частиною слугує розбірний електродіалізний модуль, що складається з наступних деталей і вузлів:

- стяжні плити;
- міжмембранні поліетиленові прокладки лабіринтового типу з поліетиленовою заставної сіткою – турбулізаторами;
- іонообмінні мембрани;
- електроди (вбудовані в стяжні плити);
- з'єднання 1/2 CPVC для приєднання до технологічних трубопроводів;
- стяжні шпильки з нержавіючої сталі і болти з шайбами;
- ущільнювальні гумові рамки.

Конструктивно електромембранний апарат являє собою пакет, що набирається послідовним чергуванням іонообмінних мембран і міжмембранних прокладок, укладених між стяжними плитами із вбудованими електродами і стягнутими за допомогою шпильок. Кожна міжмембранна прокладка з двома сусідніми (верхньою і нижньою) мембранами утворює камеру, що представляє собою герметичний канал, в порожнину якого вміщено сепаратори-турбулізатори, призначення яких створювати необхідну турбулентність потоку розчину і запобігати безпосередньому контакту мембран між собою. У міжмембранних прокладках по одній з коротких сторін зроблено робочі отвори, які при збірці утворюють вертикальні канали (колектори-розподільники) по всій висоті пакетів системи підведення і відведення розчинів, що подаються на переробку. У отворів присутні щілини, що живлять проточний канал. Шляхом повороту прокладки навколо горизонтальної (довгої) осі при збірці пакету змінюється положення живильних щілин – зміщення щілин з одного отвору на інший. Таким чином створюються ізольовані одна від одної групи камер (або тракти). У процесі роботи розчини безперервно протікають через відповідні камери апарату. Витікаючі потоки кожного тракту об'єднуються в збірних відвідних каналах. Крайні камери пакета, які розташовані безпосередньо біля електродів, є електродними. Конструкція апарату виключає контакт розчинів, що переробляються, з вузлами і деталями, крім підвідних і відвідних CPVC з'єднань, поліетиленових прокладок і мембран. В системі підключення апарату передбачені необхідні місця роз'єму для з'єднання з технологічними трубопроводами і підключення електричного живлення. Завдяки цьому апарат легко готується для переміщення в зібраному вигляді. Окрім розбірного електродіалізного модуля лабораторна установка EDL-10 складається з:

- насосів ділюата, концентрату, електроліту;
- ротаметрів для контролю швидкості потоку в камерах ділюату, концентрату, електроліту;
- манометрів для регулювання тиску в камерах ділюату, концентрату, електроліту;
- баків для розчину ділюату, концентрату, електроліту;
- блоку управління насосами;
- джерела електричного живлення;
- клапанів управління робочими розчинами;
- вентилів байпасів насосів, пробовідбірника;
- насосів подачі розчинів.

Принципова гідравлічна схема установки EDL-10 наведена на рис. 3. Основні технічні характеристики лабораторної установки EDL-10 наведено в таблиці 4.

Таблиця 4. Технічні характеристики лабораторної установки EDL-10

Тип електромембранного апарату	Багатокамерний, однопакетний, двотрактний
Розмір між мембранних прокладок, мм	247x108x1,05
Матеріал прокладок і сепаратора-турбулізатора	Поліетилен високого тиску

Розмір мембран, мм	247x108x0,5
Тип мембран:	Аніонітові Катіонітові
Кількість робочих мембран апарату, шт., всього:	20
	10 – аніонітові
	10 – катіонітові
Максимальна продуктивність по тракту, л/год	100
Коефіцієнт використання мембран, %	61
Число електродів	2
Матеріал електродів:	
Катод	нержавіюча сталь Х18Н10Т
Анод	титан марки ВТ1 з вакуумним напиленням платиною 5 мк
Межа напруги на електродах, В	0 – 100
Максимальний робочий струм, А	3,0
Максимальна температура робочих розчинів на виході з апарату:	
у проточному режимі	40 ⁰ С
у циркуляційному режимі	35 ⁰ С
Робочий напір у лінії вихідного розчину на вході в апарат, кг/см ²	0,1- 0,5
Максимально допустимий короточасний напір на вході, кг/см ²	1,5
Максимально допустима різниця напорів між трактами, кг/см ²	0,1

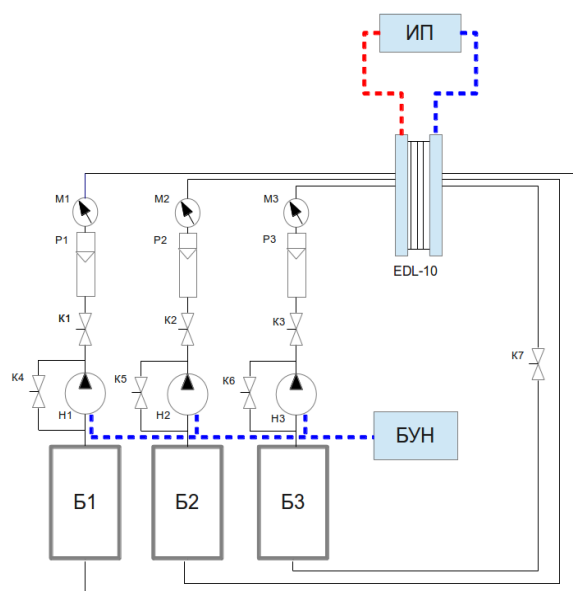


Рис. 3. Принципова гідралічна схема установки EDL-10:

Б1 - бак для розчину електроліту, Б2 - бак для концентрату, Б3 - бак для ділюату, М1 - М3 - манометри вимірювання вхідного тиску на апарат EDL-10, Р1 - Р3 - ротаметри (витратоміри), БУН - блок управління насосами, ИП - джерело електричного живлення, EDL-10 - електромембранний двухтрактний апарат лабораторний, К1-К3 - клапани керування робочими розчинами, К4 - К6 - вентилі байпасів насосів, К7 - вентиль пробовідбірника, Н1-Н3 - насоси подачі розчинів на EDL-10.

Порядок роботи на установці:

1. У робочу ємність (бак Б1) подають однорідний розчин з однаковою концентрацією іонів.

2. Одночасно вмикаються усі три насоси (Н1, Н2, Н3), вентилялі байпасів при цьому відкриті, а вхідні вентилялі апарату закриті.
3. Поступово відкриваємо вентилялі подачі розчину на електродіалізний модуль (К7), тиск та швидкість потоку в трактах вирівнюється до єдиного показника, потік води повинен бути в межах 300 л/год.
4. Подаємо напругу на апарат увімкнувши джерело живлення (ИП), робоча напруга порядку 20 В і 1А.
5. У процесі роботи апарату концентрація іонів змінюється, в камері ділюата (Б3) концентрація падає, в камері концентрату (Б2) вона зростає.
6. Процес контролюємо шляхом відбору проб через вентилялі пробовідбірників 7. Показники солемісту в трактах, електропровідності, рН, швидкості потоку, часу обробки заносимо в таблицю для фіксації даних.
6. Після роботи вимикаємо джерело живлення, перекриваємо подачу робочих розчинів на апарат, вимикаємо насоси.
7. Проводимо аналізи отриманих результатів і розчинів.

Новизна. Створена на базі методу електродіалізу лабораторна установка EDL-10 показала більшу ефективність цього методу за умови деяких удосконалень мембран і спеціальних режимів струму у порівнянні з існуючою технологією переробки шахтних вод ДП «Схід ГЗК». Підвищення ефективності роботи апарата досягається шляхом створення багатоканальних, багатокмерних збірок. Загальний вигляд лабораторної установки EDL-10 наведено на рис. 4.

Економічний ефект при використанні електродіалізної технології знесолення води досягається за рахунок зниження витрати реагентів і подальшого глибокого іонітного знесолення води. При електродіалізному знесолуванні попередньо очищеної від дисперсних частинок води не потрібні підкислення концентрату і кислотна промивка мембран. Для регенерації іонітних фільтрів можна також використовувати суміші сильних кислот, що утворюються в контурі концентрування електродіалізного апарату.

Екологічна ефективність досягається за рахунок скорочення скидання мінералізованих стоків у відкриті водойми та відводу з продувною водою тільки тих солей, які перейшли в контур концентрування з оброблюваної води.

Тестові випробування лабораторної установки EDL-10 для очищення модельних розчинів

На лабораторній установці було проведено серію тестових випробувань з використанням модельних розчинів з мінералізацією 1,5 -2,5 г/л (модельні розчини 1, 2, 3 з мінералізацією 2,5 г/л, 1,5 г/л, 2 г/л та електропровідностями 520 мкСм, 410 мкСм, 450 мкСм відповідно). Результати експериментів наведено у таблицях 5, 6, 7, 8.



Рис. 4. Загальний вигляд лабораторної установки EDL-10

Таблиця 5. Споживання енергії і хімічних речовин

	Комбінація випаровування та мембранних процесів	Випаровування	Мембранні процеси
Споживання ел. енергії (кВт.год/м ³)	25,22	26,02	24,06
Відновлення чистої води / загальне (%)	0,39	0,62	0,02
Споживання сірчаної кислоти (кг/м ³)	80	77	52
Споживання гідроксиду натрію (кг/м ³)	2,51	0,663	4,65

Таблиця 6. Результати експериментів із знесолення модельного розчину 1 з використанням лабораторної установки EDL-10

№	Час очищення, хв	Об'єм води, л	Швидкість потоку, л/хв		рН		Електропровідність мкСм		Тиск, атм	Напруга, В	Робочий струм, А	
			а	б	а	б	а	б			а	б
1	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	25	0,18	51	0,25	0,05
2	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	22	0,18	51	0,25	0,05
3	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	23	0,18	51	0,25	0,05
4	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	25	0,18	51	0,25	0,07
5	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	25	0,18	51	0,25	0,06
6	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	27	0,18	51	0,25	0,06
7	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	24	0,18	51	0,25	0,05
8	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	28	0,18	51	0,25	0,05
9	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	26	0,18	51	0,25	0,05
10	180	55	0,4	0,4	5-6	5-6	520	25	0,18	51	0,25	0,05

а – вихідний модельний розчин, б - розчин після обробки на EDL-10

Таблиця 7. Результати експериментів із знесолення модельного розчину 2 з використанням лабораторної установки EDL-10

№	Час	Об'єм	Швидкість потоку,	рН	Електропровідність мкСм	Тиск,	Напруга, В	Робочий струм,
---	-----	-------	-------------------	----	-------------------------	-------	------------	----------------

	очищення, хв	води, л	л/хв						атм		А	
			а	б	а	б	а	б			а	б
1	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	14	0,03	51	0,24	0,04
2	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	13	0,03	51	0,24	0,04
3	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	15	0,03	51	0,24	0,07
4	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	15	0,03	51	0,24	0,06
5	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	14	0,03	51	0,24	0,05
6	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	12	0,03	51	0,24	0,05
7	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	16	0,03	51	0,24	0,05
8	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	15	0,03	51	0,24	0,08
9	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	15	0,03	51	0,24	0,06
10	180	70	0,4	0,4	5-6	5-6	410	15	0,03	51	0,24	0,04

а – вихідний модельний розчин 1, б – розчин після обробки на EDL-10

Таблиця 8. Результати експериментів із знесолення модельного розчину 3 з використанням лабораторної установки EDL-10

№	Час очищення, хв	Об'єм води, л	Швидкість потoku, л/хв		рН		Електропровідність, мкСм		Тиск, атм.	Напруга, В	Робочий струм, А	
			а	б	а	б	а	б			а	б
1	160	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	17	0,02	51	0,3	0,07
2	160	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	18	0,02	51	0,3	0,07
3	160	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	18	0,02	51	0,3	0,06
4	160	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	18	0,02	51	0,3	0,05
5	160	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	18	0,02	51	0,3	0,06
6	160	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	19	0,02	51	0,3	0,05
7	160	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	16	0,02	51	0,3	0,07
8	160	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	18	0,02	51	0,3	0,05
9	160	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	18	0,02	51	0,3	0,06
10	180	60	0,3	0,3	5-6	5-6	450	25	0,02	51	0,3	0,07

а – вихідний модельний розчин 1, б - розчин після обробки на EDL-10

Зміну електропровідності розчинів катіонів та аніонів з часом, при перенесенні їх крізь відповідну мембрану у лабораторній установці EDL-10, наведено на рис. 5.

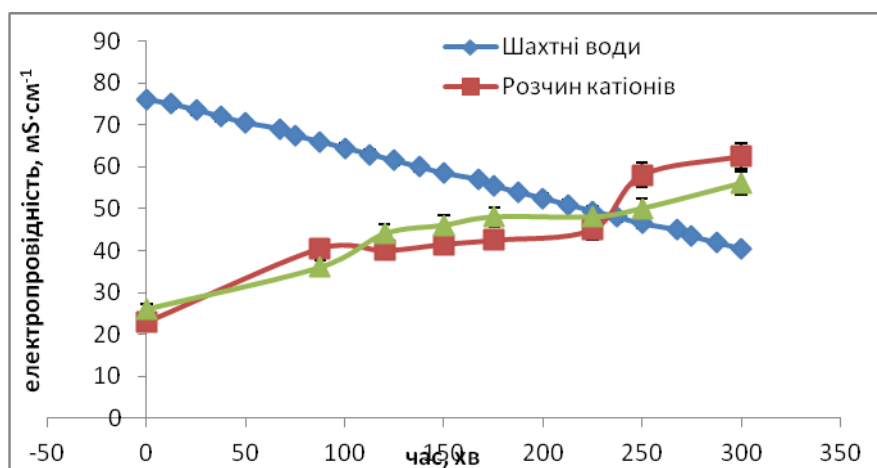


Рис. 5. Зміна електропровідності розчинів катіонів та аніонів, при перенесенні їх крізь відповідну мембрану у лабораторній установці EDL-10

З наведених даних видно, що зі збільшенням часу дослідження кількість іонів, що мігрують у аналітну чи каталітну камеру збільшується. Слід звернути увагу на те, що кількість катіонів і аніонів, які пройшли крізь відповідні мембрани, приблизно однакова. Це вкрай важливо, оскільки при змішуванні концентрованих розчинів з аналітної та каталітної камер якісний склад розчину буде ідентичним вихідній воді, що піддавалась знесоленню.

Якісний склад води після очищення залишається практично незмінним, в той час, як її мінералізація значно зменшується.

Висновки

Спільне використання електродіалізу і методу співосадження, що призводить до співосадження урану на частинках сульфату кальцію на стадії після процесу коагуляції, дозволяє підвищити ефективність очищення шахтних вод Інгільської шахти ДП «Схід ГЗК» до концентрації не більше 0,01 мг / дм³.

Запропонована технологія дає можливість безпосереднього скиду очищених урановмісних шахтних вод у відкриті водоймища.

Використання змінного електричного струму в технологіях електродіалізу значно розширює область його застосування і дозволяє використовувати для очищення стоків підприємств уранопереробної промисловості.

ЛІТЕРАТУРА

1. «Розробка технології з підвищення ефективності очищення шахтних вод від хімічних забруднювачів» - Закл. звіт про НДР - договір № 944/35 від 04.10.2012 р. між ДУ «ІГНС НАН України» та ДП «СхідГЗК» - номер держреєстрації 0112U008121. – К., 2012., - 73 маш.арк.
2. «Створення установки очищення рідких радіоактивних відходів об'єктів ядерно-паливного циклу» - Закл. звіт про НДР - договір № 36 від 17.03.2014 р. – ДУ «ІГНС НАН України» - номер держреєстрації 0114U002702. – К., 2014. – 71 маш.арк.
3. Патент України, № UA 77398. Спосіб одержання активованої суспензії бентоніту. *Забулонов Ю.Л., Кадошніков В.М., Лисиченко Г. В., Литвиненко Ю. В.* // Заявка № U 2012 09789 от 14.08.12. Оpubл. 11.02.13. - Бюл. №3.
4. Патент України № UA 77123. Спосіб очищення вод, забруднених важкими металами, радіонуклідами, у присутності органічних речовин різної природи. *Ю. Л.Забулонов, Кадошніков В. М., Литвиненко Ю. В.* // Заявка № U 2012 09790 от 14.08.12.- Оpubл. 25.01.13. – Бюл. №2.
5. *Zabulonov Y., Lytvynenko Y., Rozko A., Phedorenko Y., Kadoshnykov V., Yurzhenko M.* Sorption of cations of different nature mineral-polymeric composite based on sodium polyacrylate // VIII Ukrainian-Polish conference "Polymers of special applications" 01-04 October 2014: abstract book. - smt. Polyanitsya Bukovel, Ukraine.
6. *Zabulonov Y., Lytvynenko Y., Rozko A., Phedorenko Y., Kadoshnykov V.* Special polymeric mineral composites with increased sorption activity to the transition metal ions // "Polymers of special applications": VIII Ukrainian-Polish conference 01-04 October 2014: abstract book. – smt. Polyanitsya, Ukraine, 2014. – P. 166-168.
7. *Забулонов Ю.Л., Кадошніков В.М., Литвиненко Ю.В.* Вплив електромагнітного поля на фізико-хімічні властивості дисперсних систем у багатокомпонентних рідинах, що містять радіонукліди // Сб. науч. тр. СНИЭП. – Севастополь, 2009. - Вып. 04. - С. 113-120.

REFERENCES

1. «Rozrobka tekhnolohii z pidvyshchennia efektyvnosti ochyshchennia shakhtnykh vod vid khimichnykh zabrudniuvachiv» [Development of technology to improve the efficiency of the mine water treatment chemical pollutants]- Zakl. zvit pro NDR - dogovir № 944/35 vid 04.10.2012 p. mizh SI «IGNS NAN Ukraine» ta DP «ShidGZK» - № DR 0112U008121. Kiev: [in Ukraine]
2. «Stvorennia ustanovky ochyshchennia ridkykh radioaktyvnykh vidkhodiv ob'ektiv yaderno-palyvnoho tsykladu» [Creating a clean installation of liquid radioactive wastes of the nuclear fuel cycle] - Zakl. zvit pro NDR - dogovir № 36 vid 17.03.2014 p. – SI «IGNS NAN Ukraine» № DR 0114U002702. Kiev [in Ukraine]
3. Patent Ukrainy № UA 77398. Sposib odergannia actyvovanoi suspenzii bentonitu [Method activated bentonite slurry] *Yu. Zabulonov, V. Kadoshnikov, G. Lysychenko, Yu. Lytvynenko* // Zaiavka № U 2012 09789 ot 14.08.12. - Opubl. 11.02.13. – Biul. №3. Kiev: [in Ukraine].
4. Patent Ukrainy № UA 77123. Sposib ochyshchennia vod, zabrudnennykh vazhkymy metalamy, radionuklidamy, u prysutnosti orhanichnykh rehovyn riznoi pryrody [The method of treating water contaminated with heavy metals, radionuclides, organic compounds in the presence of different nature]

- Yu. Zabulonov, V. Kadoshnikov, Yu. Lytvynenko // Zaiavka № U 2012 09790 ot 14.08.12.- Opubl. 25.01.13– Biul. №2. Kiev: [in Ukraine]*
5. *Yu. Zabulonov, Yu. Lytvynenko, A. Rozko, Yu. Phedorenko, V. Kadoshnykov, M. Yurzhenko Sorption of cations of different nature mineral-polymeric composite based on sodium polyacrylate // VIII Ukrainian-Polish conference "Polymers of special applications" 01-04 October 2014: abstract book. - smt. Polyanicya Bukovel, Ukraine.*
 6. *Yu. Zabulonov, Yu. Lytvynenko, A. Rozko, Yu. Phedorenko, V. Kadoshnykov Special polymeric mineral composites with increased sorption activity to the transition metal ions // "Polymers of special applications": VIII Ukrainian-Polish conference 01-04 october 2014: abstract book. – smt. Polyanitsya, Ukraine, 2014. – P. 166-168.*
 7. *Yu. Zabulonov, V. Kadoshnykov, Yu. Lytvynenko Vplyv elektromahnitnoho polia na fizyko-khimichni vlastyivosti dyspersnykh system u bahatokomponentnykh ridynakh, shcho mistiat radionuklidy [The impact of electromagnetic fields on the physicochemical properties of dispersed systems in multicomponent fluids containing radionuclides]// Sb. nauch. tr. SNYEP. (2009). Sevastopol: [in Ukraine]*

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОД НА ПРИМЕРЕ ИНГУЛЬСКОЙ ШАХТЫ ГП «ВОСТОК ГОК»

Данилов С. В., Забулонов Ю. Л., Одукалец Л. А., Кадошников В. М.

Забулонов Ю. Л. чл.-кор. НАН Украины, докт. тех. наук, проф., зав. отд. ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», zabulonov@mail.ru;

Данилов С. В. аспирант ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», SeRg <svdanilov@yahoo.com>;

Одукалец Л. А. н.с. ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», laoduk@i.ua

Кадошников В. М. н.с. ГУ «Институт геохимии окружающей среды НАН Украины», vm.kadoshnikov@gmail.com

В работе описан метод повышения эффективности очистки шахтных вод и способ его реализации. Комбинированное использование электродиализа и метода соосаждения заключается в том, что сначала происходит соосаждение урана на частицах сульфата кальция, а последующее применение электродиализа после процесса коагуляции наночастиц позволяет получить очистку стока с концентрацией урана не более 0,01 мг / дм³. Рассмотрена возможность извлечения не только урана, но его спутников: радия, полония и др. В статье приведены результаты исследований с применением установки очистки шахтных вод, в том числе результаты лабораторных измерений состава шахтных вод ГП «Восток ГОК», поступающих на установку, состав шахтных вод, прошедших процесс очистки на УОШВ Ингульской шахты ГП «Восток ГОК» и сбрасываемых в окружающую среду и результаты тестовых экспериментов с обессоливания раствора с использованием лабораторной установки EDL-10. Показана перспективность использования электродиализа при переменном электрическом токе. При протекании переменного тока в электрохимической системе создаются условия для осуществления более широкого класса различных электрохимических реакций в растворах, на электродах и межфазной границе электрод-электролит, электролит-мембрана. Преимуществом применения нестационарного режима при электродиализе является его низкая чувствительность к концентрации ионов водорода (pH), что позволяет работать как с сильно кислыми, так и с сильно щелочными растворами. Подтверждено ограничения применения электродиализа, что связано с невозможностью изъятия незаряженных компонентов высокоминерализованных растворов, если такие будут присутствовать.

Ключевые слова: электродиализ, шахтные воды, очистка, мембраны, лабораторная установка, обессоливание, смягчение, pH.

IMPROVEMENT OF EFFICIENCY OF MINE WATERS CLEANING BY THE EXAMPLE OF INGULSKAYA MINE OF SE « VostGOK»

S. Danilov, Yu. Zabulonov, L. Odukalets, V. Kadoshnikov

Yu. Zabulonov Cor. Member NASU, D.Sc. (Tech.) SI «Institute of Environmental Geochemistry NAS Ukraine», zabulonov@mail.ru;

S. Danilov Doctoral Student SI «Institute of Environmental Geochemistry NAS Ukraine» SeRg <svdanilov@yahoo.com>

L. Odukalets, researcher SI «Institute of Environmental Geochemistry NAS Ukraine», laoduk@i.ua

V. Kadoshnikov researcher SI «Institute of Environmental Geochemistry NASU», vm.kadoshnikov@gmail.com

The paper describes a method for increasing in the efficiency of mine water treatment and the method of its implementation. The combined use of electrodialysis and the coprecipitation method is that the first is coprecipitation of uranium on the particles of calcium sulfate, and the next use of electrodialysis process after coagulation nanoparticles can get effluent with uranium concentration of less than $0.01 \text{ mg} / \text{dm}^3$. The possibility of extracting not only uranium, but its associated elements: radium, polonium, and others. The article presents the results of studies using mine water treatment installations, including the results of laboratory measurements of mine water of Subsidiary "VostGOK", coming to setting, the composition of mine waters that have undergone treatment at MWTI of Inhulskaya Mine of State Enterprise " VostGOK » and results of test experiments on solution desalt using a laboratory setup EDL-10. The perspective of using electrodialysis with an alternating electric current is showed. When alternating current flows in an electrochemical system, it is created the conditions for the implementation of the broader class of electrochemical reactions in various solutions on the electrodes and the interface electrode-electrolyte, the electrolyte membrane. The advantage of the application of unsteady mode during electrodialysis is its low sensitivity to hydrogen ion concentration (pH) that allows to work with both strongly acidic and strongly alkaline solutions. The restrictions of use of electrodialysis, that are due to the impossibility of removal of the uncharged components of highly solutions, if any are present, are confirmed.

Keywords: *electrodialysis, mine water treatment, membrane laboratory facility, desalination, softening, pH.*