

Вивчено процеси натрій-катіонно-го пом'якшення високомінералізованих вод з використанням сильно- та слабокислотних катіонітів для стабілізації води. Показано, що слабокислотний катіоніт Dowex Mac-3 в натрій формі забезпечує ефективне вилучення іонів жорсткості із води при високих концентраціях іонів натрію (>1650 мг-екв/дм³), що дозволяє ефективно переробляти високомінералізовані води

Ключові слова: знесолення води, катіоніт, пом'якшення води, регенерація катіоніту, кислотність, лужність

Изучены процессы натрий-катионного умягчения высокоминерализованных вод с использованием сильно- и слабокислотных катионитов для стабилизации воды. Показано, что слабокислотный катионит Dowex Mac-3 в натрий форме обеспечивает эффективное удаление ионов жесткости из воды при высоких концентрациях ионов натрия (>1650 мг-экв/дм³), что позволяет эффективно перерабатывать высокоминерализованные воды

Ключевые слова: обессоливание воды, катионит, умягчение воды, регенерация катионита, кислотность, щелочность

УДК 628:162:66.097.718

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.75338

ДОСЛІДЖЕННЯ ІОНООБМІННОГО ПОМ'ЯКШЕННЯ ВИСОКО- МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОД

М. Д. Гомеля

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри*

E-mail: m.gomelya@kpi.ua

В. М. Грабітченко

Аспірант*

E-mail: shyomasya@mail.ru

А. Г. Трохименко

Кандидат біологічних наук, доцент

Кафедра екологічної безпеки та охорони праці

Національний університет

кораблебудування ім. адмірала Макарова

пр. Героїв Сталінграду, 9, м. Миколаїв, Україна, 54025

E-mail: antr@ukr.net

Т. О. Шаблій

Доктор технічних наук, доцент*

E-mail: dsts1@ukr.net

*Кафедра екології та технології рослинних полімерів

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Часто процеси знесолення, очищення та кондиціонування вод пов'язані з іонообмінними процесами їх пом'якшення. Дані процеси застосовують при стабілізаційній обробці води для водоциркуляційних систем охолодження чи перед її зворотньоосмотичним опрісненням. Іонний обмін також широко використовується при очищенні сольових розчинів від іонів жорсткості перед їх електролізом (отримання гіпохлориту натрію та інших окислених сполук хлору).

Реагентні методи пом'якшення завжди супроводжуються утворенням та виділенням осадів, що значно ускладнює технологію і характеризуються недостатньою ефективністю. З іншої сторони, ефективність іонообмінного знесолення води залежить від рівня її мінералізації. При цьому застосування іонного обміну для обробки мінералізованих вод вважається проблематичним. Тому визначення умов іонообмінного пом'якшення мінералізованих вод є актуальною проблемою.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В технологіях знесолення води все частіше застосовують зворотньоосмотичний та нанофільтраційний методи [1]. Дані методи широко використовуються і

для очищення стічних вод [2]. Недоліком даних методів є застосування дорогих напівпроникних мембран, що вимагає високоефективного попереднього очищення води для запобігання утворенню відкладень на мембранах. В роботі [3] показано, що недостатньо ефективно механічне очищення води перед баромембранними процесами знижує продуктивність мембран та погіршує їх селективність. Крім ефективного механічного очищення води необхідно запобігати відкладенню на поверхні мембрани карбонату та сульфату кальцію, що цілком можливо, якщо врахувати, що вміст сульфатів у морській воді досягає 35 мг-екв/дм³, а жорсткість – 40–60 мг-екв/дм³.

Найпростішим способом стабілізації води щодо осадковідкладень є використання антискалантів [4]. Та через їх токсичність та великі об'єми концентратів, які скидаються при зворотньоосмотичному опрісненні води, значно ускладнюється проблема переробки відходів. Менш токсичними є антискантанти на основі поліакрилових кислот та їх похідних [5], проте через їх високу вартість значно зростають витрати на очищення води.

При реагентному пом'якшенні води [6] значно ускладнюється технологія попереднього освітлення води. Крім того, вода має підвищені значення рН. Стабілізаційна обробка води шляхом вилучення сульфатів [7] передбачає використання дорогих алюмінієвих коагулянтів та супроводжується утворенням великих об'ємів осадів, що ускладнює освітлення води. Засто-

сування іонного обміну для стабілізаційної обробки води [8] можливе при відносно не високому солевмісті. При високих концентраціях хлористого натрію процеси десорбції іонів жорсткості переважають процеси сорбції, що різко знижує ефективність пом'якшення води на сильноокислотних катіонітах.

Низькою ємністю по іонах важких металів та іонах жорсткості також характеризуються органічні та неорганічні іоніти в сильномінералізованій воді [9]. Використання слабоокислотних катіонітів в кислій формі при попередній обробці води забезпечує ефективну декарбонізацію води при невисокій ефективності її пом'якшення [10]. За низької лужності води при високому рівні мінералізації застосування слабоокислотних катіонітів в кислій формі не забезпечує її ефективного пом'якшення [11]. В цілому, не дивлячись на широке використання іонного обміну при кондиціонуванні води [12], використання даного методу для стабілізаційної обробки солоних природних та стічних вод неефективне. Одним із недоліків застосування слабоокислотних катіонітів для пом'якшення води є дуже низька ефективність їх регенерації [13]. Але саме тому доцільне їх використання при пом'якшенні солоних вод із високим вмістом іонів натрію.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи було визначення ефективності іонообмінного пом'якшення високомінералізованих вод в залежності від типу та форми іоніту з подальшою послідовною регенерацією катіонітів для ефективної десорбції іонів жорсткості.

Для дослідження поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- вивчення процесів натрій-катіонного пом'якшення високомінералізованих вод на сильно- та слабоокислотному катіонітах;
- визначення ефективності декарбонізації води при застосуванні слабоокислотного катіоніту в кислій формі;
- вивчення процесів регенерації сильно- та слабоокислотних катіонітів при послідовному використанні розчинів соляної кислоти.

4. Матеріали та методи дослідження

В процесах іонообмінного пом'якшення води використовували сильноокислотний катіоніт в Na^+ формі та слабоокислотний катіоніт Dowex Mac-3 в кислій та Na^+ формі. Процеси пом'якшення проводили при фільтруванні модельних розчинів через шар катіонітів об'ємом 20–50 см^3 , що знаходились у колонках діаметром 19 мм. Витрата розчинів при сорбції 10–12 $\text{см}^3/\text{хв}$, при регенерації 1–2 $\text{см}^3/\text{хв}$. У відібраних пробах об'ємом 200 см^3 (при сорбції) та 50 см^3 (при регенерації) визначали загальну жорсткість, концентрацію кальцію, кислотність та лужність.

При сорбції використовували модельні розчини:

M1: $\text{Ж}_{\text{поч}}=50$ мг-екв/ дм^3 , $\text{Л}_{\text{поч}}=5,8$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Ca}^{2+})=22$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Mg}^{2+})=28$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Cl}^-)=192$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{SO}_4^{2-})=28$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Na}^+)=176$ мг-екв/ дм^3 , $\text{pH}=8,0$;

M2: $\text{Ж}_{\text{поч}}=50$ мг-екв/ дм^3 , $\text{Л}_{\text{поч}}=4,0$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Ca}^{2+})=24$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Mg}^{2+})=32$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Cl}^-)=300$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{SO}_4^{2-})=33$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Na}^+)=281$ мг-екв/ дм^3 , $\text{pH}=8,2$;

M3: $\text{Ж}_{\text{поч}}=90$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Ca}^{2+})=65$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Mg}^{2+})=25$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Cl}^-)=105$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{SO}_4^{2-})=5$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Na}^+)=15$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{pH}=7,5$;

M4: $\text{Ж}_{\text{поч}}=150$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Ca}^{2+})=75$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Mg}^{2+})=75$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Cl}^-)=165$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Na}^+)=15$ мг-екв/ дм^3 , $\text{pH}=7,3$;

M5: $\text{Ж}_{\text{поч}}=59,5$ мг-екв/ дм^3 , $\text{Л}_{\text{поч}}=3,1$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Ca}^{2+})=26,5$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Mg}^{2+})=33$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Na}^+)=478$ мг-екв/ дм^3 , $\text{pH}=6,5$;

M6: $\text{Ж}_{\text{поч}}=60$ мг-екв/ дм^3 , $\text{Л}_{\text{поч}}=3,0$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Ca}^{2+})=24$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Mg}^{2+})=36$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Cl}^-)=1638$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{SO}_4^{2-})=36$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Na}^+)=1617$ мг-екв/ дм^3 , $\text{pH}=6,3$;

M7: $\text{Ж}_{\text{поч}}=59$ мг-екв/ дм^3 , $\text{Л}_{\text{поч}}=19$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Ca}^{2+})=26$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{Mg}^{2+})=33$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Cl}^-)=500$ мг-екв/ дм^3 , $\text{C}(\text{SO}_4^{2-})=33$ мг-екв/ дм^3 ,
 $\text{C}(\text{Na}^+)=493$ мг-екв/ дм^3 , $\text{pH}=6,5$.

Для регенерації використовували 10 %-й розчин соляної кислоти.

Значення повної обмінної динамічної ємності іонітів та ступінь їх регенерації розраховували за відомими методиками [10].

5. Результати іонообмінного пом'якшення мінералізованих розчинів

Результати по пом'якшенню розчинів M1 та M2 на сильноокислотному катіоніті КУ-2-8 в Na^+ -формі приведені на рис. 1. Як видно з рис. 1, ПОДЕ іоніту по іонах жорсткості знижується з 1744 до 1295 мг-екв/ дм^3 при зростанні концентрації іонів натрію у вихідному розчині із 176 до 281 мг-екв/ дм^3 . При цьому ємність до проскоку відповідно знижувалась із 1050 до 495 мг-екв/ дм^3 . Подальше підвищення вмісту хлориду натрію у воді було недоцільне, тому що вже в 3 %-му розчині хлориду натрію відбувається ефективна десорбція іонів жорсткості [11].

На відміну від сильноокислотного катіоніту КУ-2-8 слабоокислотний Dowex Mac-3 характеризується високою ємністю по іонах жорсткості не лише при очищенні розчинів з низькою концентрацією хлориду натрію (рис. 2), але і при значному рівні мінералізації (рис. 3).

Так в розчині M5 вміст хлориду натрію близький до 3 %, але ПОДЕ катіоніту в даних умовах досягала 3106 мг-екв/ дм^3 .

Більше того, навіть при концентрації хлористого натрію близькій до 100 г/ дм^3 (10 %) даний катіоніт забезпечував ефективне вилучення іонів жорсткості з води. ПОДЕ іоніту по іонах кальцію сягала 1500 мг-екв/ дм^3 , а по іонах жорсткості в цілому – 2600 мг-екв/ дм^3 (рис. 4). Це свідчить про те, що даний катіоніт в Na^+ -формі здатний сорбувати іони кальцію та магнію

в умовах, коли в разі сильнокислотних катіонітів відбувається десорбція іонів жорсткості. Тобто даний катіоніт здатний сорбувати іони жорсткості із розчинів з високим вмістом іонів натрію.

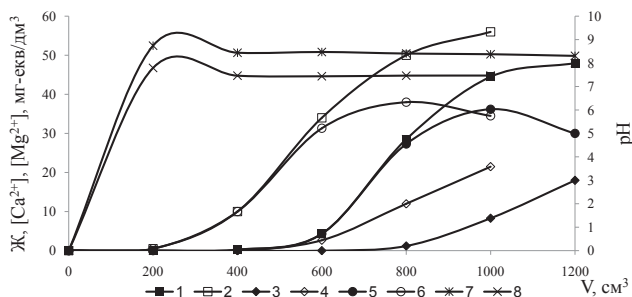


Рис. 1. Залежність жорсткості (1; 2), концентрації іонів кальцію (3; 4), магнію (5; 6) та pH (7; 8) від пропущеного об'єму модельного розчину M1 (1; 3; 5; 7) та M2 (2; 4; 6; 8) через катіоніт КУ-2-8 в Na^+ -формі ($V_i=20 \text{ см}^3$); $ПОД\epsilon_1=1744 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_2=1295 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_3=1045 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_4=838 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_5=699 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_6=457 \text{ мг-екв/дм}^3$

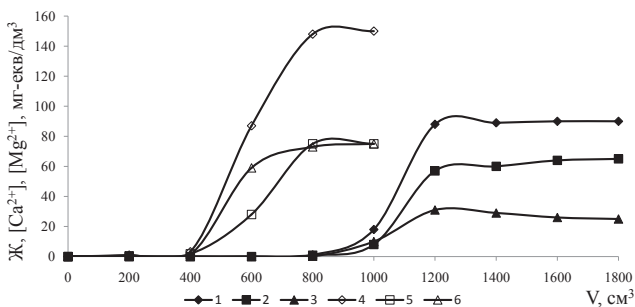


Рис. 2. Залежність вихідної жорсткості (1; 4), концентрації іонів кальцію (2; 5) та магнію (3; 6) від пропущеного об'єму розчину M3 через іоніт Dowex Mac-3 в Na^+ -формі ($V_i=20 \text{ см}^3$); $ПОД\epsilon_1=4412 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_2=3400 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_3=1012 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_4=4038 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_5=2148 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_6=1890 \text{ мг-екв/дм}^3$

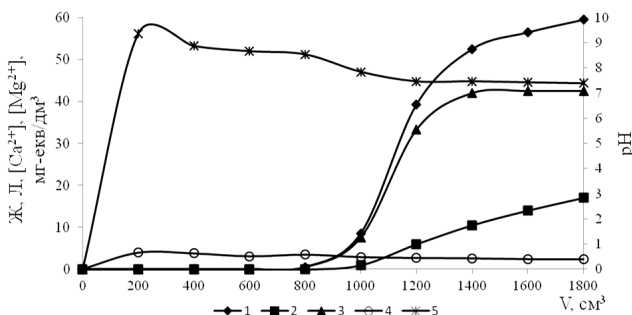


Рис. 3. Залежність вихідних значень жорсткості (1), концентрації іонів кальцію (2), магнію (3), лужності (4) та pH (5) від пропущеного об'єму розчину M5 через катіоніт Dowex Mac-3 в Na^+ -формі ($V_i=20 \text{ см}^3$); $ПОД\epsilon_1=3106 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_2=1810 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_3=1296 \text{ мг-екв/дм}^3$

Цікаві результати було отримано при обробці високомінералізованих розчинів на слабокислотному катіоніті Dowex Mac-3 в кислій формі. Як відомо [11],

за відсутності карбонат та гідрокарбонат іонів даний катіоніт в кислій формі не сорбує катіони металів з розчинів солей сильних кислот. Проте в разі розчинів із гідрокарбонатною лужністю відбувається часткове пом'якшення води із повною її декарбонізацією на першому етапі (рис. 5). При цьому відбувається підкислення води та зниження її pH до 3–4. В подальшому, при вичерпанні ємності катіоніту, pH піднімається до 7, а лужність – до початкових значень.

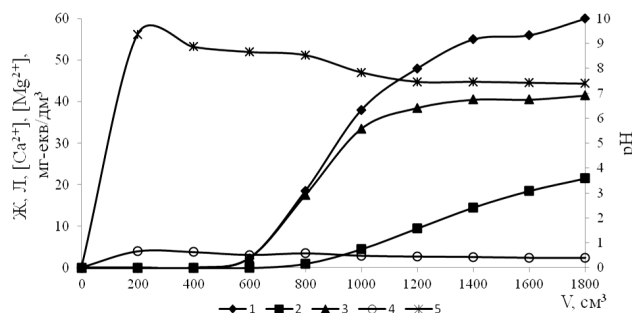


Рис. 4. Залежність вихідних значень жорсткості (1), концентрації іонів кальцію (2), магнію (3), лужності (4) та pH (5) від пропущеного об'єму розчину M6 через катіоніт Dowex Mac-3 в Na^+ -формі ($V_i=20 \text{ см}^3$); $ПОД\epsilon_1=2622 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_2=1510 \text{ мг-екв/дм}^3$, $ПОД\epsilon_3=1112 \text{ мг-екв/дм}^3$

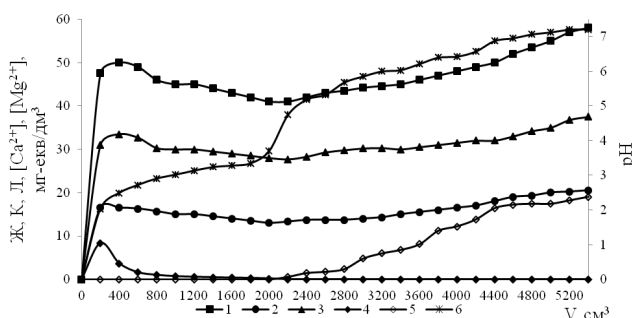


Рис. 5. Залежність вихідних значень жорсткості (1), концентрації іонів кальцію (2), магнію (3), кислотності (4), лужності (5) та pH (6) від пропущеного об'єму розчину M7 через катіоніт Dowex Mac-3 в H^+ -формі ($V_i=20 \text{ см}^3$)

Даний ефект доцільно застосовувати при обробці води з мінералізацією до $2,0\text{--}2,5 \text{ г/дм}^3$. В цьому випадку можливе послідовне використання катіоніту Dowex Mac-3 в кислій формі та катіоніту КУ-2-8 в Na^+ -, що забезпечує декарбонізацію та пом'якшення води при стабільному значенні pH на рівні 7.

Процеси регенерації катіонітів кислотами та солями добре вивчені [14, 15]. В роботі було визначено умови використання відпрацьованих регенераційних розчинів, що утворюються при регенерації сильнокислотних катіонітів для регенерації слабокислотних катіонітів. Як видно з рис. 6, при послідовному пропусканні 10 %-го розчину HCl через катіоніти КУ-2-8 та Dowex Mac-3 в Ca, Mg-формі досягнуто практично повної десорбції іонів жорсткості як із сильно-, так і з слабокислотного катіоніту.

Ефективної регенерації сильнокислотного катіоніту досягнуто за рахунок значного надлишку кислоти. При цьому надлишок кислоти в розчині в подальшому забезпечував десорбцію іонів жорсткості із слабокислотного катіоніту, який навіть в слабокислотному середо-

вищі переходить в асоційовану форму і легко десорбує катіони металів [10]. Такий спосіб регенерації катіонів забезпечує значне зниження витрат кислоти при застосуванні двохступеневого катіонування води при її пом'якшенні та знесоленні.

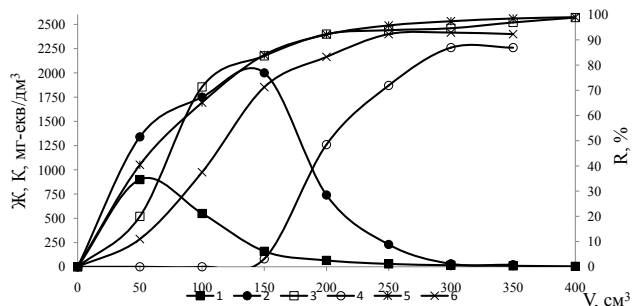


Рис. 6. Вихідні криві десорбції іонів Ж (1; 2) та залежність кислотності (3; 4), ступеню десорбції іонів жорсткості (5; 6) від пропущеного об'єму 10 %-го розчину НСl послідовно через катіоніти КУ-2-8 (1; 3; 5) та Dowex Mac-3 (2; 4; 6) в Са, Mg-формі при об'ємі іоніту 50 см³

6. Обговорення результатів досліджень по пом'якшенню мінералізованих розчинів на сильно- та слабокислотних катіонітах

Якщо порівняти дані, приведені на рис. 1–4, то можна відмітити суттєве зниження ємності сильнокислотного катіоніту по іонах жорсткості при підвищенні концентрації іонів натрію в розчині. Для слабокислотного катіоніту дана тенденція менш помітна (табл. 1). Навіть при концентрації хлористого натрію ≈ 100 г/дм³ ПОДЕ по іонах жорсткості для катіоніту Dowex Mac-3 перевищує 2600 мг-екв/дм³. Слід відмітити, що селективність обох катіонітів по іонах кальцію вища в порівнянні з іонами магнію.

Таблиця 1

Залежність обмінної ємності сильно- та слабокислотних катіонітів по іонах кальцію і магнію в залежності від катіонного складу води

Катіоніт	Концентрація катіонів в розчині, мг-екв/дм ³			ПОДЕ, мг-екв/дм ³		
	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ , Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
КУ-2-8	176	22	28	1744	1045	699
	281	24	32	1295	838	457
Dowex Mac-3	15	65	25	4412	3400	1012
	15	75	75	4038	2148	1890
	468	26	33	3106	1810	1296
	1638	24	36	2622	1510	1112

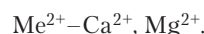
В разі слабокислотного катіоніту селективність по іонах кальцію зростає по мірі зростання концентрації хлориду натрію у розчині. Це має велике значення тому, що в більшості випадків утворення відкладень спричиняють саме сполуки кальцію – карбонати та сульфати. Тому тривалість фільтроциклу при пом'якшенні води на катіоніті можна визначити саме по проскоку іонів кальцію. В цілому це дозволить суттєво підвищити ефективність використання катіонітів при іонообмінному пом'якшенні мінералізованих розчинів.

Особливістю натрій-катіонного пом'якшення води є підвищення рН середовища до 8–9 після обробки води на іонообмінному фільтрі. Це характерно як для сильно- так і для слабокислотних катіонітів (рис. 1, 3, 4). Обумовлено це переходом гідрокарбонатів кальцію та магнію в гідрокарбонат натрію при обміні іонів жорсткості на іони натрію. Ну а гідроліз гідрокарбонату натрію проходить сильніше, тому що луг є значно сильнішою основою в порівнянні з гідроксидами кальцію та магнію.

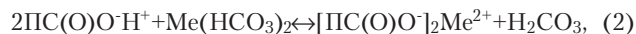
При використанні слабокислотного катіоніту в кислій формі сорбція іонів жорсткості можлива лише при певних концентраціях гідрокарбонатів або карбонатів у воді. За інших умов відбувається підкислення води, що призводить до переходу іоніту в асоційовану форму і погіршення його іонообмінних властивостей. Згідно реакції (1) процес проходить за схемою:



де П – залишок полімерної матриці,



Так як соляна кислота сильніша за карбонову кислоту іоніту, реакція (1) не проходить. З іншої сторони, в присутності гідрокарбонатів реакція іде з виділенням вугільної кислоти (2), (3):



Саме тому ємність слабокислотного катіоніту в кислій формі по іонах жорсткості визначається гідрокарбонатною лужністю води (рис. 5). Реакції (2), (3) зумовлюють як декарбонізацію води, так і її підкислення.

Власне саме низька кислотність карбоксильних груп катіоніту Dowex Mac-3 забезпечує високу ефективність його регенерації, в тому числі і відпрацьованими регенераційними розчинами (рис. 6).

7. Висновки

1. Визначено вплив концентрації солей натрію у водних розчинах на ефективність їх пом'якшення на катіонітах. Показано, що із зростанням концентрації катіонів натрію у воді ємність сильнокислотного катіоніту по іонах жорсткості знижується. Ємність слабокислотного катіоніту Dowex Mac-3 в Na⁺-формі по іонах жорсткості залишається високою при підвищенні концентрації хлористого натрію в розчині до 100 г/дм³.

2. Встановлено, що при використанні слабокислотного катіоніту Dowex Mac-3 в кислій формі відбувається декарбонізація води із частковим пом'якшенням. Зниження жорсткості води на катіоніті в кислій формі обмежується рівнем гідрокарбонатної лужності.

3. Показано, що кислі регенераційні розчини після регенерації сильнокислотного катіоніту КУ-2-8 в Ca²⁺, Mg²⁺-формі можна використовувати для регенерації слабокислотного катіоніту Dowex Mac-3 у Ca²⁺, Mg²⁺-формі. В цьому разі відбувається повна регенерація слабокислотного катіоніту Dowex Mac-3, що обумовлено низькою кислотністю його карбоксильних груп.

Література

1. Greenlee, L. F. Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges [Text] / L. F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, P. Moulin // Water Research. – 2009. – Vol. 43, Issue 9. – P. 2317–2348. doi: 10.1016/j.watres.2009.03.010
2. Щербатюк, М. О. Обессоливание минерализованных шахтных вод в помощью обратноосмотического метода [Текст] / М. О. Щербатюк, В. Т. Львов, А. И. Сердюк // Вісник Донецького Національного Університету. Природничі науки. – 2009. – № 1. – С. 430–435.
3. Трус, І. М. Вплив попереднього механічного доочищення води на ефективність зворотньоосмотичного опріснення води [Текст] / І. М. Трус, М. Д. Гомеля, В. М. Радовенчик // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2013. – № 9 (198). – С. 197–202.
4. Greenlee, L. F. The effect of antiscalant addition on calcium carbonate precipitation for a simplified synthetic brackish water reverse osmosis concentrate [Text] / L. F. Greenlee, F. Testa, D. F. Lawler, B. D. Freeman, P. Moulin // Water research. – 2010. – Vol. 44, Issue 9. – P. 2957–2969. doi: 10.1016/j.watres.2010.02.024
5. Li, H.-Y. Inhibition of calcium and magnesium-containing scale by a new antiscalant polymer in laboratory tests and a field trial [Text] / H.-Y. Li, W. Ma, L. Wang, R. Liu, L.-S. Wei, Q. Wang // Desalination. – 2006. – Vol. 196, Issue 1-3. – P. 237–247. doi: 10.1016/j.desal.2005.11.024
6. Макаренко, І. Н. Применение гидроксоалюмината натрия при кондиционировании воды для систем охлаждения в промышленности и энергетике [Текст] / І. Н. Макаренко, Т. А. Шаблій, Т. В. Крысенко // Химия и технология воды. – 2009. – Т. 31, № 5. – С. 542–551.
7. Feng, D. Treatment of acid mine water by use of heavy metal precipitation and ion exchange [Text] / D. Feng, C. Aldrich, H. Tan // Minerals Engineering. – 2000. – Vol. 13, Issue 6. – P. 623–642. doi: 10.1016/S0892-6875(00)00045-5
8. Талхи, Ф. М. Дослідження методів попередньої підготовки води з високою жорсткістю для мембранного кондиціонування [Текст] / Ф. М. Талхи, Н. В. Макарова, І. М. Астрелін, Н. М. Толстопалова // Вісник НТУУ «КПІ». – 2008. – № 4. – С. 127–131.
9. Vaaramaa, K. Removal of metals and anions from drinking water by ion exchange [Text] / K. Vaaramaa, J. Lehto // Desalination. – 2003. – Vol. 155, Issue 2. – P. 157–170. doi: 10.1016/S0011-9164(03)00293-5
10. Макаренко, І. М. Застосування слабокислотного катіоніту Dowex MAC-3 для стабілізаційної обробки води [Текст] / І. М. Макаренко, О. В. Глушко, В. В. Рисухін, В. П. Малін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 6 (57). – С. 16–20. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/4034/3699>
11. Макаренко, І. М. Стабілізаційна обробка морської води у процесі її зворотньоосмотичного опріснення [Текст] / І. М. Макаренко // Екологія и промышленность. – 2014. – № 4. – С. 60–65.
12. Alexandratos, S. D. Ion-exchange resins: a retrospective from industrial and engineering chemistry research [Text] / S. D. Alexandratos // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2009. – Vol. 48, Issue 1. – P. 388–398. doi: 10.1021/ie801242v
13. Гомеля, Н. Д. Кондиционирование воды для ресурсосберегающих систем водопользования [Текст] / Н. Д. Гомеля, Т. А. Шаблій, Ю. А. Носачева // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2004. – № 4. – С. 55–58.
14. Рисухін, В. В. Вплив концентрації розчинів сірчаної кислоти, форми катіоніту Dowex MAC-3 на ефективність його регенерації [Текст] / В. В. Рисухін, О. В. Глушко, І. М. Макаренко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – № 34. – С. 137–145.
15. Голтвяницкая, Е. В. Оценка эффективности использования слабокислотного катионита Dowex MAC-3 в катионном умягчении воды [Текст] / Е. В. Голтвяницкая, Т. А. Шаблій, Н. Д. Гомеля, С. С. Ставская // Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 2 (8). – С. 87–92.