

ЗАХИСТ ПРИРОДНИХ ВОДОЙМ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ ЙОНАМИ МІДІ ПРИ СКИДАННІ СТИЧНИХ ВОД ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Г.Г. Трохименко¹, М.Д. Гомеля²

¹Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ
e-mail: gomelya@users.ntu-kpi.kiev.ua

Наведено результати досліджень зі стабілізаційної обробки води для підживлення водооборотних систем охолодження йонообмінним методом. Вивчено процеси пом'якшення води на сильно- та слабокислотних катіонітах у присутності йонів міді. Визначено залежність ефективності очищення води від йонів міді та її пом'якшення в залежності від форми йоніту та витрати води. Показано, що застосування слабкислотного катіоніту в кислій формі забезпечує практично повну декарбонізацію води при частковому її підкисленні. Застосування йонітів у сольовій формі дозволяє нейтралізувати воду при ефективному її пом'якшенні та очищенні від йонів міді. Вивчено процеси регенерації катіонітів кислими та сольовими розчинами. Показано, що підживлення систем охолодження пом'якшеною водою дозволить впровадити безстічні водоциркуляційні системи охолодження, що забезпечить надійний захист водойм від забруднення йонами зі міді стічних вод електростанцій.

Ключові слова: катіоніт, важкі метали, йонний обмін, регенерація йонітів, водоциркуляційні системи.

Вступ

На сьогоднішній день на електростанціях України використовують водооборотні системи охолодження, підживлення яких відбувається без попереднього пом'якшення води. Для забезпечення стабільності води щодо осадовідкладень на теплообмінному обладнанні підтримують допустимий рівень жорсткості та лужності води за рахунок регулювання скиду води на продувку системи. Враховуючи те, що жорсткість води у більшості джерел водопостачання перевищує 4 мг-екв/дм³, а карбонатна жорсткість і лужність досягає 3,9 мг-екв/дм³ і більше, то обсяги скиду води на продувку систем досягають досить значних величин. Так, на Запорізькій АЕС скид на продувку води коливається в межах 10-15 м³/с (864000-1296000 м³/добу). Проблема ускладнюється тим, що через об'єктивні причини вода в циркуляційних системах електростанцій забруднена йонами важких металів, і найбільше - йонами міді. Так, згідно з даними [1, 2] вміст йонів міді в ставку-охолоджувачі сягає 0,023-0,0374 мг/дм³ при фоновій концентрації йонів міді в Каховському водосховищі 0,006 мг/дм³. При існуючих вимогах до якості води у водоймах рибогосподарського призначення при скиді вод на продувку систем у контрольному створі концентрація міді не повинна перевищувати 0,007 мг/дм³, а в каналі, яким вода скидається із ставка охолоджувача, концентрація міді не повинна перевищувати 0,01 мг/дм³. Але враховуючи надходження міді з водою, що йде на підживлення систем охолодження, та надходження міді лише з конденсаторів турбін, концентрація міді у воді, яка скидається, досягає 0,02-0,03 мг/дм³. Це у 2-3 рази вище допустимого рівня. Тому вирішити проблему за рахунок регулювання скиду води на продувку неможливо. Це стосується не лише Запорізької АЕС, але й усіх енергетичних об'єктів, що скидають воду у водойми рибогосподарського призначення.

Вирішити проблему за рахунок очищення води від йонів міді за їх концентрацій 0,02-0,07 мг/дм³ та концентрації йонів жорсткості на рівні 40-100 мг/дм³ досить складно.

Кращим варіантом є вдосконалення технології водопідготовки за рахунок пом'якшення води, що подається на підживлення систем. При значному зниженні карбонатної жорсткості води у водоциркуляційних системах можна значно скоротити скид води на продувку систем, а значить зменшити забір природної води. І тоді вирішення задачі кондиціонування води, що

подається на підживлення систем охолодження, буде цілком реальним, так само як і захист водою від забруднення йонами міді.

Мета роботи

Метою роботи було визначення ефективності вилучення йонів міді з води в присутності йонів жорсткості під час її пом'якшення, вивчення процесів регенерації йонітів, створення маловідходної технології очищення води від йонів міді під час її пом'якшення для зниження скиду води на продувку систем охолодження електростанцій та захисту водою від забруднення йонами міді.

Методи та об'єкти дослідження

У роботі використовували слабокислотний катіоніт DOWEX-МАС-3 в кислій та сольовій формах та сильнокислотний катіоніт КУ-2-8 в сольовій формі. Катіоніт DOWEX-МАС-3 у кислу форму переводили 2%-вим розчином хлоридної кислоти, в Na^+ форму йоніт переводили шляхом обробки лугом йоніту в кислій формі. Слабокислотний йоніт в Ca^{2+} -, Mg^{2+} - та Si^{2+} -формі розчином хлориду натрію не регенерується [3].

Мідь на катіонітах сорбували з розчинів в артезіанській та водопровідній воді при концентраціях 3,32; 5,30 та 39,24 мг/дм³. Характеристики артезіанської води: $Ж=5,6$ мг-екв/дм³; $Л=5,40$ мг-екв/дм³; $C_{Ca^{2+}}=4,7$ мг-екв/дм³; $C_{Mg^{2+}}=0,9$ мг-екв/дм³; $C_{Cl^-}=282$ мг/дм³; $C_{SO_4^{2-}}=23$ г/дм³, $pH\ 7,25$.

Характеристики водопровідної води: $Ж=4,80$ мг-екв/дм³, $C_{Ca^{2+}}=3,6$ мг-екв/дм³; $C_{Mg^{2+}}=1,2$ мг-екв/дм³; $Л=4,80$ мг-екв/дм³; $C_{Cl^-}=37,6$ мг-екв/дм³; $C_{SO_4^{2-}}=49,7$ мг-екв/дм³; $pH\ 7,10$.

Сорбцію проводили, фільтруючи розчини через шар йоніту в колонці діаметром 2 см³ (об'єм йоніту 10 см³) з витратою 15 см³/хв. Регенераційні розчини пропускали з витратою 1 см³/хв. В очищеній воді контролювали вміст йонів міді, жорсткість, лужність, рівень рН. Концентрації йонів міді та йонів жорсткості контролювали за відомими методиками [4].

Аналіз отриманих результатів

Відомо, що селективність катіонітів за двохзарядними катіонами, головним чином, залежить від радіусу гідратованого катіону. Тому селективність більшості катіонітів за йонами кальцію близька до їх селективності за йонами важких металів, таких як мідь, цинк, нікель, так як радіуси їх гідратних оболонок досить близькі між собою.

У такому випадку, головним фактором, що впливає на йоннообмінне вилучення важких металів з води, є рівень їх концентрацій та вміст йонів жорсткості у воді. За низьких концентрацій йонів важких металів вилучення їх із води з високим рівнем жорсткості буде неефективним. Це ж стосується і йонів міді. Проте, при йоннообмінному пом'якшенні води цілком можливе і вилучення йонів міді з води, хоча ємність йоніту за міддю буде далекою від максимальної [5].

Як видно з результатів, наведених на рис.1, при концентрації міді в артезіанській воді на рівні 1,234 мг-екв/дм³, що в 4,5 раз нижче, в порівнянні із концентрацією йонів жорсткості, обмінна ємність слабокислотного катіоніту DOWEX-МАС-3 за міддю досягає 1548 та 1733 мг-екв/дм³, що лише у ~ 2 рази нижче його ємності за йонами жорсткості (відповідно 3095 та 3620 мг-екв/дм³). У цілому, даний йоніт характеризується високою ємністю [6] в сольовій формі. У даному випадку він сорбує мідь при концентрації 3,32 мг-екв/дм³ (рис. 1, крива 2). В кислій формі він сорбує катіони лише за наявності гідрокарбонат аніонів (за високої лужності води).

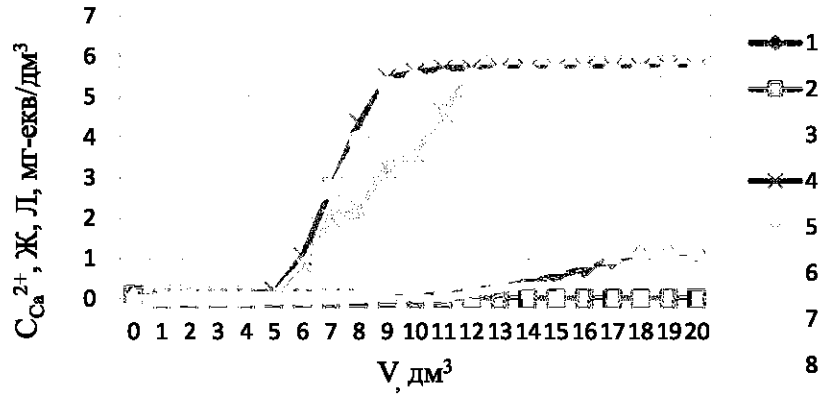


Рис. 1. Залежність вихідної концентрації йонів міді (1; 2; 3), жорсткості (4; 5; 6), лужності (7; 8) від пропущеного об'єму артезіанської води ($Ж = 5,6$ мг-екв/дм³; $Л = 5,4$ мг-екв/дм³; $C_{Ca^{2+}} = 4,7$ мг-екв/дм³; $C_{Mg^{2+}} = 0,9$ мг-екв/дм³; $C_{Cl^-} = 82$ мг/дм³) з концентрацією йонів міді $39,24$ мг/дм³ (1; 3; 4; 6; 7) та $3,32$ мг/дм³ (2; 5; 8) через катіоніт Dowex-МАС-3 в Na^+ (1; 2; 4; 5; 7) та H^+ (3; 6; 8) формі ($V_i=10$ см³) (ОДЄ₁ = 1733 мг-екв/дм³; ОДЄ₂ = 207 мг-екв/дм³; ОДЄ₃ = 1548 мг-екв/дм³; ОДЄ₄ = 3620 мг-екв/дм³; ОДЄ₅ = 4458 мг-екв/дм³; ОДЄ₆ = 3095 мг-екв/дм³).

Пов'язано це з тим, що під час сорбції катіонів на катіоніті в кислій формі відбувається підкислення води. За наявності гідрокарбонат-аніонів вони зв'язують протони з утворенням вугільної кислоти, яка виділяється у вигляді CO_2 . За відсутності гідрокарбонат-аніонів під час сорбції катіонів підкислення розчину відбувається до тих пір, поки за низьких значень рН дисоційовані карбонільні групи катіоніту не перейдуть в асоційовану форму, яка неактивна під час йонного обміну.



де П-полімерний залишок.



Саме це забезпечує досить глибоку декарбонізацію води (рис. 1, крива 5) та її підкислення (рис. 2, крива 1) при фільтруванні через даний катіоніт у кислій формі.

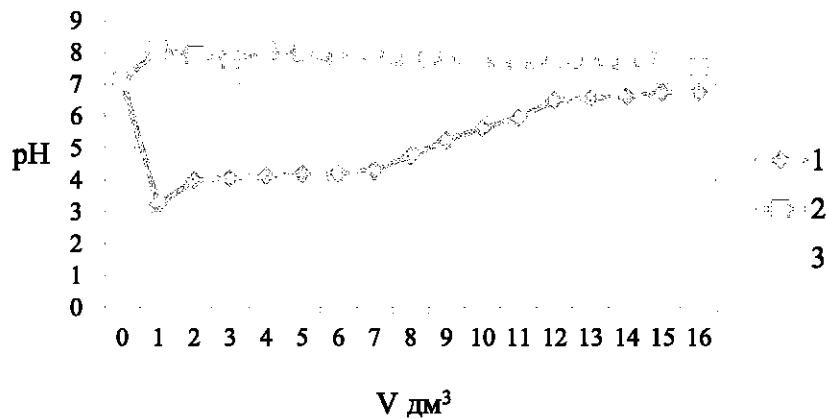
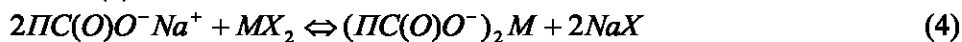


Рис. 2. Зміна рН середовища водопровідної води ($Ж = 4,8$ мг-екв/дм³; $[Ca^{2+}] = 3,6$ мг-екв/дм³; $[Mg^{2+}] = 1,2$ мг-екв/дм³; $Л = 4,8$ мг-екв/дм³) в залежності від об'єму, пропущеного через катіоніт Dowex-МАС-3 в H^+ -формі ($V_i=10$ см³) (1), КУ-2-8 в Na^+ -формі ($V_i=10$ см³) (2), та послідовно через катіоніт Dowex-МАС-3 в H^+ -формі ($V_i=10$ см³) та катіоніт КУ-2-8 в Na^+ -формі ($V_i=10$ см³) (3).

В цілому, для води із лужністю, близькою до жорсткості (рис. 1), відмічено достатньо високу ємність йоніту як за йонами міді, так і за йонами жорсткості. Але через підкислення розчину та зниження ступеня дисоціації карбоксильних груп катіоніту його ємність за даними йонами дещо нижча, у порівнянні з йонітом у сольовій формі, йонний обмін на якому протікає за реакцією (4):



де $M - \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Cu}^{2+}$; $X - \text{аніон}(\text{Cl}^-, \text{HCO}_3^-)$.

Перевагою слабокислотного катіоніту є висока ефективність його регенерації в кислому середовищі [6,7], що підтверджують результати, наведені на рис. 3.

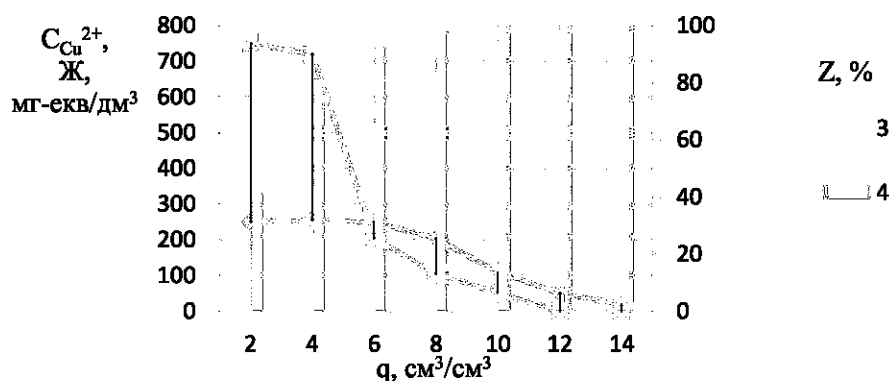


Рис. 3. Залежність концентрації йонів міді (1) та йонів жорсткості (2), ступеня десорбції йонів міді (3) та йонів жорсткості (4) від питомої витрати 1-н розчину хлоридної кислоти на слабокислотний катіоніт Dowex-МАС-3 ($V_i=10 \text{ см}^3$) в Cu^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} -формі.

Як видно з рисунку, основна кількість міді та йонів жорсткості десорбується при питомій витраті регенераційного розчину $8 \text{ см}^3/\text{см}^3$ йоніту. При цьому у перших пробах сумарний вміст катіонів у мг-екв у розчині дорівнював його кислотності. Тобто регенерація йоніту відбувається при незначному надлишку кислого реагенту. Це пов'язано з тим, що в кислому середовищі карбоксильні групи йоніту переходять в асоційовану форму, що сприяє десорбції катіонів металів. Проте, як і більшість слабокислотних катіонітів [3], даний катіоніт в Ca -, Mg -, Cu - формі не регенерується сольовими розчинами (NaCl , Na_2SO_4 і т.п.) незалежно від їх концентрацій. Це стосується й інших дво- та тризарядних катіонів, сорбованих на слабокислотному катіоніті DOWEX-МАС-3.

Головним недоліком даного катіоніту є те, що під час його використання для пом'якшення води в кислій формі відбувається її підкислення. З одного боку, це забезпечує її повну декарбонізацію та високу стабільність щодо карбонатних відкладень. З другого, - підкислена вода є корозійно-активною і непридатною для використання в більшості технологічних процесів. А використання катіоніту в сольовій (Na^+ -формі) ускладнюється тим, що його переведення в Na^+ -форму при регенерації можливе лише при послідовній обробці розчином кислоти та лугу, що не є технологічним.

Відомо, що високу ефективність при катіонному пом'якшенні води забезпечує катіоніт КУ-2-8 в Na^+ -формі. Як показали дослідження (рис. 4), даний катіоніт, поряд із пом'якшенням води забезпечує досить ефективно вилучення йонів міді. І хоча він за йонами міді та йонами жорсткості має дещо меншу ємність у порівнянні зі слабокислотним катіонітом DOWEX-МАС-3, його перевагою є простота регенерації, доступність та відносно невисока ціна.

Як видно з рис. 4, катіоніт КУ-2-8 в Na^+ -формі забезпечує ефективно пом'якшення води в присутності йонів міді. Повна обмінна динамічна ємність (ПОДЕ) йоніту за йонами

жорсткості складала 2947 мг-екв/дм³. За міддю його ємність складала всього 179 мг-екв/дм³. Проте в усіх пробах концентрація міді після катіоніту не перевищувала 0,28 мг/дм³ при початковій концентрації 5,3 мг/дм³. Очевидно, що і за умов, коли йоніт перейшов в Ca^{2+} , Mg^{2+} форму він іще міг певний час сорбувати йони міді. Адже відомо, що даний йоніт сорбує йони міді в Ca^{2+} -формі [8]. Проте, за таких низьких концентрацій йонів міді до встановлення динамічної рівноваги за йонами міді потрібно було б пропускати десятки кубічних дециметрів води при об'ємі йоніту всього 10 см³. Даний дослід показує, що катіоніт КУ-2-8 сорбує йони міді з води навіть за її низьких концентрацій при жорсткості 4,8 мг-екв/дм³.

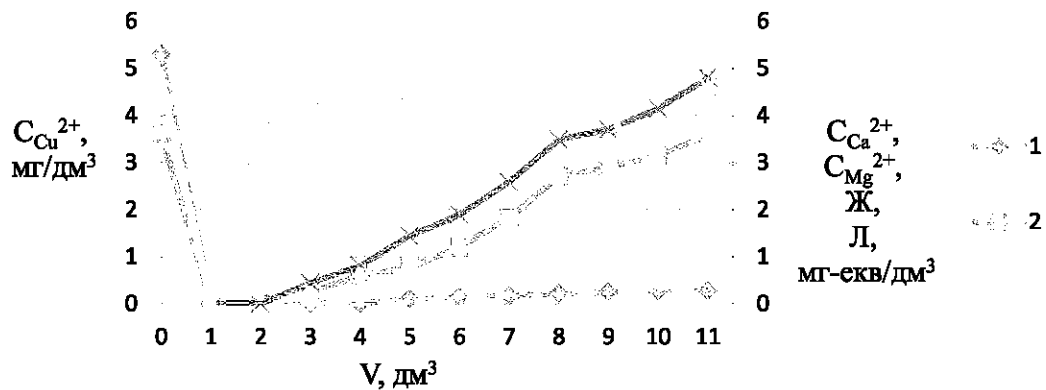


Рис. 4. Залежність залишкової концентрації міді (1), кальцію (2), магнію (3), жорсткості (4), лужності (5) розчину міді у водопровідній воді ($J = 4,8$ мг-екв/дм³; $C_{Ca^{2+}} = 3,6$ мг-екв/дм³; $C_{Mg^{2+}} = 1,2$ мг-екв/дм³; $L = 4,8$ мг-екв/дм³; $C_{Cu^{2+}} = 5,3$ мг/дм³) від пропущеного об'єму розчину через катіоніт КУ-2-8 в Na^+ формі ($V_f=10$ см³); (ОДЄ₁ = 179 мг-екв/дм³; ПОДЄ₂ = 2262 мг-екв/дм³; ПОДЄ₃ = 685 мг-екв/дм³; ПОДЄ₄ = 2947 мг-екв/дм³).

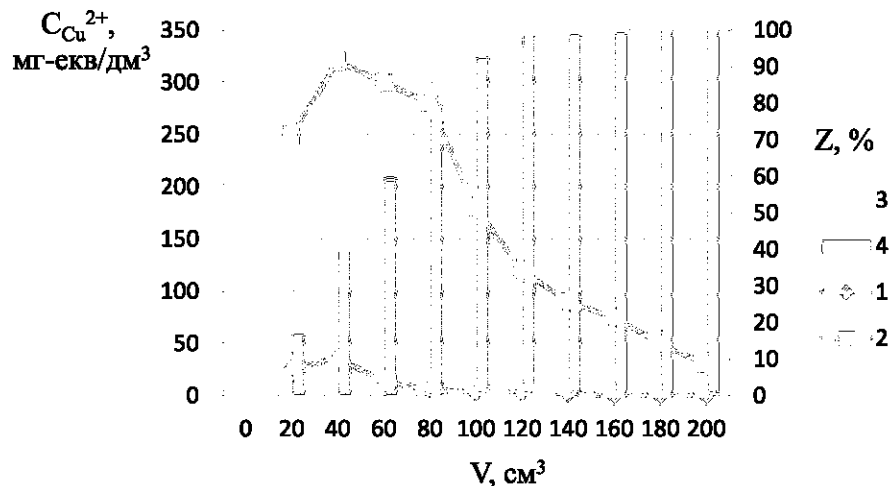


Рис. 5. Залежність концентрації йонів міді (1) та йонів жорсткості (2), ступеня десорбції міді (3) та йонів жорсткості (4) від пропущеного об'єму 10%-вого розчину хлориду натрію через катіоніт КУ-2-8 в Cu^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} -формі ($V_f=10$ см³).

Цікавим результатом є висока ефективність десорбції йонів міді в процесі сольової регенерації катіоніту (рис. 5). У разі сорбції заліза регенерація ускладнювалась окисненням заліза (II) до заліза (III) та гідролізом останнього [9]. Мідь за рівнів рН 7,10-8,09 (рис. 2,

крива 2) не гідролізується, а тому ефективно десорбується при обробці розчином хлориду натрію. Ще кращі умови для сорбції та десорбції міді при послідовному використанні катіоніту DOWEX-MAС-3 у кислій формі та КУ-2-8 у Na^+ -формі. Тоді рН розчину не виходить за межі 7,10-7,60.

Перевагою сольової регенерації катіоніту КУ-2-8 (10%-вим розчином хлориду натрію) є простота переробки і відновлення регенераційного розчину. При його обробці розчинами луку та соди у кількостях, еквівалентних вмісту кальцію та магнію, а в даному випадку і міді, відбувається осадження $CaCO_3$, $Mg(OH)_2$, $Cu(OH)_2$ [10]. Отриманий розчин хлориду натрію із незначним вмістом кальцію та магнію забезпечує таку саму ефективність регенерації, як і свіжоприготовлений розчин $NaCl$.

На основі отриманих результатів можна запропонувати досить просту, маловідходну технологію кондиціонування води для підживлення систем охолодження в енергетиці (рис. 6).

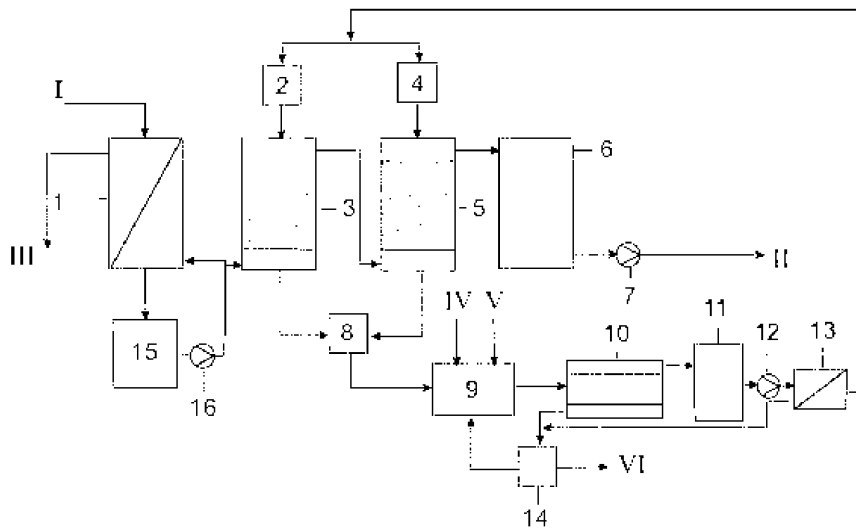
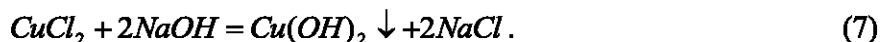
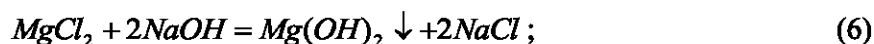


Рис. 6. Принципова технологічна схема станції підготовки води для систем охолодження електростанцій: 1 – ультрафільтраційний фільтр; 2, 4 – резервуари з 10%-вим розчином $NaCl$; 3, 5 – катіонообмінні фільтри (КУ-2-8 у Na^+ -формі), 6 – резервуар пом'якшеної води; 7, 12, 16 – насоси; 8 – резервуар відпрацьованих регенераційних розчинів; 9 – реактор; 10 – тонкошаровий відстійник; 11 – резервуар освітленого розчину $NaCl$; 13 – стрічковий фільтр; 14 – фільтр-прес; 15 – резервуар освітленої води; I – подача води із ставка-охолоджувача; II – подача води на підживлення системи охолодження; III – скид промивних вод; IV – подача розчину соди; V – подача розчину луку; VI – осад на переробку.

За даною схемою вода із ставка-охолоджувача після очищення на ультрафільтраційній установці (1), яка забезпечує повне вилучення завислих, колоїдних домішок та високомолекулярних розчинених речовин, надходить на катіонообмінні фільтри. Двохстадійне катіонування забезпечує як повне вилучення йонів жорсткості, так і глибоке очищення води від йонів міді. На першій стадії катіонування фільтри працюють до проскоку йонів жорсткості на рівні концентрацій – 1,5-2,0 мг-екв/дм³, що дозволяє більш повно використовувати ємність катіоніту. На другій стадії катіонування фільтри працюють до проскоку йонів жорсткості на рівні 0,1 мг-екв/дм³. Це дозволяє досить ефективно пом'якшувати воду та практично повністю очищати її від йонів міді. При цьому при досягненні проскоку фільтри першого ступеня катіонування відключаються по чергово на регенерацію, а після цього включаються на доочищення води на другій стадії катіонування. Фільтри з другого ступеню катіонування після проскоку йонів жорсткості переключаються на очищення води із ставка охолоджувача, тобто переключаються на першу стадію

катіонування. Це дозволяє максимально ефективно використовувати обмінну ємність катіоніту на обох стадіях катіонування. Регенерація катіоніту проводиться 10%-вим розчином хлориду натрію при подачі з резервуарів (2 і 4). Відпрацьовані регенераційні розчини з резервуару (8) подаються в реактор (9), де обробляються содою і лугом. При цьому розчин очищається від двохвалентних катіонів за схемою:



Осад виділяється із води у тонкошаровому відстійнику (10), а далі після фільтру (13) подається для повторного використання. Відділений у відстійнику та на фільтрі осад направляється на виробництво будівельних матеріалів, як це описано в [11]. Слід відмітити, що відновлений регенераційний розчин хлориду натрію забезпечує високу ефективність регенерації йоніту при підвищенні його рН до 10,5 [3]. Проте, насправді, після висадження йонів кальцію і магнію рН розчину знижується до 8,7-9,5.

Вода з резервуару пом'якшеної води подається на підживлення систем охолодження. Промивання ультрафільтраційних установок здійснюється зворотнім током освітленої води при почерговому відключенні модулів.

Якщо виходити із кількості міді, що надходить в ставок-охолоджувач Запорізької АЕС ~ 18 т/рік, [2], то для вилучення всієї міді необхідно створити йоннообмінну установку з об'ємом катіоніту 18 м^3 . При цьому при ємності йоніту за йонами міді всього 100 мг-екв/дм^3 , щодоби з води буде вилучатись 50 кг міді, або 18 т/рік. При цьому в системі охолодження буде подаватись щодоби $\sim 10000 \text{ м}^3$ практично повністю пом'якшеної води. За таких умов суттєво скоротиться скид води на продувку систем при зниженні концентрації міді до рівнів, нижчих допустимих при скиді стічних вод.

Висновки

1. Вивчено процеси очищення води від йонів міді у під час її катіонообмінного пом'якшення. Показано, що слабокислотний катіоніт DOWEX-МАС-3 забезпечує глибоку декарбонізацію води при задовільному її пом'якшенні у разі застосування в кислій формі. Сильно- та слабокислотні йоніти забезпечують очищення води від міді в процесах натрій-катіонітового пом'якшення.

2. Визначено умови ефективної регенерації сильно- та слабокислотних катіонітів розчинами хлориду натрію та хлоридної кислоти. Встановлено, що слабокислотний катіоніт ефективно регенерується після сорбції двозарядних катіонів розчинами кислоти. Регенерація розчинами хлориду натрію неефективна. 10%-й розчин NaCl забезпечує ефективну регенерацію катіоніту КУ-2-8 та високий ступінь десорбції йонів міді.

3. Розроблено маловідходну технологічну схему підготовки води для систем охолодження електростанцій, яка забезпечує глибоке пом'якшення води з вилученням із неї йонів міді, що дозволяє суттєво скоротити скид води на продувку систем та знизити скид міді до допустимого рівня.

ЗАЩИТА ПРИРОДНЫХ ВОДОЕМОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИОНАМИ МЕДИ ПРИ СБРОСЕ СТОЧНЫХ ВОД ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.Г. Трохименко¹, Н.Д. Гомеля²

¹Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

²Киевский национальный технический университет «Киевский политехнический институт», г. Киев

e-mail: gomelya@users.ntu-kpi.kiev.ua

Приведены результаты исследований по стабилизационной обработке воды для подпитки водооборотных систем охлаждения ионообменным методом. Изучены процессы смягчения воды на сильно- и слабокислотных катионитах в присутствии ионов меди. Определена зависимость эффективности очистки воды от меди и ее смягчения в зависимости от формы ионита и расхода воды. Показано, что применение слабокислотных катионитов в кислой форме обеспечивает практически полную декарбонизацию воды при частичном ее подкислении. Применение ионитов и в солевой форме позволяет нейтрализовать воду при эффективном ее смягчении и очистке от ионов меди. Изучены процессы регенерации катионитов кислыми и соевыми растворами. Показано, что подпитка систем охлаждения смягченной водой позволит внедрить бессточные циркуляционные системы охлаждения, что обеспечит надежную защиту водоемов от загрязнения ионами меди со сточных вод электростанций.

Ключевые слова: катионит, тяжелые металлы, ионный обмен, регенерация ионитов, водоциркуляционные системы.

THE PROTECTION OF NATURAL RESERVOIRS FROM POWER PLANT ACCIDENTAL POLLUTION BY COPPER IONS

G.G.Trohymenko¹, M.D.Gomelya²

¹Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

²National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv

e-mail: gomelya@users.ntu-kpi.kiev.ua

The results of the water stabilization treatment studies to feed the cooling water circulation systems by ion exchange method are reported. The processes of the water softener on strongly and weakly acidic cation resins in the presence of copper ions are studied. The relation of the water purification efficiency from copper and its softening depending on the form of the ion-exchanger and water consumption was determined. It is shown that the use of weakly acidic cation resin in the acid form provides nearly complete decarbonization of water by partial acidification. The use of ion exchangers in salt form allowsto neutralize the waterwith effective mitigation and clean-up of the copper ions. The processes of cation resin regeneration by acidic and saline solutions were analyzed. It is shown that the make-up cooling systems by softened water will introduce stagnant circulation cooling system that will provide reliable protection of waters from pollution by power plan wastewater copper ions.

Keywords: cation resin, heavy metals, ion exchange, ion-exchanger regeneration, water circulating systems.

Список літератури:

1. Мороз Н.А. Содержание тяжёлых металлов и минерализация поверхностных вод региона расположения Запорожской АЭС [Текст]/ Н.А. Мороз, И.А. Черкашин // Сб. научн. Тр. СИЯЭиП. — 2004. — №10 — с. 73—78.
2. Мороз Н.А. Гидрохимический мониторинг поверхностных вод региона расположения Запорожской АЭС [Текст]/ Н.А. Мороз, В.А. Седнев, И.А. Черкашин // Пром. Теплотехника. — 2005. — Т. 27, №2 — С. 78—87.
3. Гомеля Н.Д. Кондиционирование воды для ресурсосберегающих систем водопользования [Текст]/ Н.Д. Гомеля, Т.А. Шаблій, Ю.В. Носачова // Экотехнологии и ресурсосбережение — 2004. — №4 — с. 55—58.
4. Лурье Ю.Ю. Справочник по аналитической химии / Ю.Ю. Лурье — М.: Химия — 1989. — 44 с.
5. Макаренко І.М. Оцінка впливу іонів твердості на ефективність очищення води від іонів міді [Текст]/ І.М. Макаренко, Ю.В. Носачова, О.І. Іваненко // Вісник НТУУ «КПУ» серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження» — 2014. — №1 (12) — С. 54—59.
6. Макаренко І.М. Застосування слабокислотного катіоніту DOWEX-МАС-3 для стабілізаційної обробки води [Текст] // І.М. Макаренко, О.В. Глушко, В.В. Рисухін, В.П. Малін // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2012. — №3/6 (57). — с. 16—20.
7. Рисухін В.В. Вплив концентрації розчинів сірчаної кислоти, форми катіоніту DOWEX-МАС-3 на ефективність його регенерації [Текст] // В.В. Рисухін, О.В. Глушко, І.М. Макаренко // Вісник національного технічного університету «ХПУ» — 2012. — №34. — с. 137—135
8. Шаблій Т.О. Вилучення іонів міді з води теплообмінних циркуляційних систем [Текст]/ Т.О. Шаблій // Східно-Європейський журнал передових технологій — 2010. — №3/8 (45) — с. 10—13.
9. Гомеля И.Н. Оценка эффективности катионитов КУ-2-8 и Aqualitek -100 FC при умягчении воды в присутствии ионов железа [Текст] // И.Н. Гомеля, Ю.А. Омельчук, В.М. Радовенчик // Экотехнологии и ресурсосбережение. — 2008. — №3. — с. 62—65.
10. Шаблій Т.А. Разработка эффективной технологии умягчения воды для промышленного водопотребления [Текст]/ Т.А. Шаблій, И.Н. Макаренко, Е.В. Голтвяницкая // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — №1. — С. 53—58.
11. Трус І.М. Переробка осадів, що утворюються при очищенні шахтних вод від сульфатів [Текст]/ Трус І.М., Флейшер Г.Ю., Гомеля М.Д., Токарчук В.В. // Вісник КрНУ. — 2014. — №4. — С. 169—174.