

УДК 628.164-926.41

РАДОВЕНЧИК Я. В. *, ГОРДІЄНКО К. Ю., КРИСЕНКО Т. В., РАДОВЕНЧИК В. М.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИДАЛЕННЯ ІОНІВ МАГНІЮ З ВОДИ В ПРОЦЕСАХ ЇЇ ПОМ'ЯКШЕННЯ

Значні концентрації іонів кальцію та магнію в природних водах змушують надавати попередньому пом'якшенню більшість господарсько-питних та енергетичних вод. Тому технології пом'якшення набувають сьогодні особливої гостроти, а дослідження в цій галузі щорічно нарощуються. Оскільки жорсткість води визначається сумарним вмістом іонів кальцію та магнію, то саме ці елементи знаходяться в центрі уваги таких досліджень. Традиційно вважається, що видаленню підлягають, перш за все, іони кальцію, а іони магнію менш схильні до утворення твердої фази. Однак, ефективність технології пом'якшення в однаковій мірі залежить від обох катіонів. Тому іонам магнію варто також приділяти достатню увагу. Перспективним реагентом в цьому напрямку вважається фосфат натрію. Його використання в процесах видалення іонів кальцію дозволяє забезпечити в широкому діапазоні температур та водневого показника залишкову жорсткість води на рівні 0,1 – 0,2 мг-екв/дм³. Детальні дослідження використання фосфату натрію в процесах видалення іонів магнію показали його недостатню ефективність. Ефективність содово-натрієвого пом'якшення дозволяє забезпечити при рН 11,0 – 11,5 залишкову жорсткість води на рівні 0,4 – 0,6 мг-екв/дм³. Але необхідність корегування водневого показника та висока витрата реагентів роблять цю технологію мало придатною для широкого використання. Визначальним фактором в процесах пом'якшення води з використанням фосфат-іонів є співвідношення між концентраціями фосфат-іонів та іонів магнію $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [Mg^{2+}, \text{мг-екв}]$. Зважаючи на жорсткі вимоги чинних нормативних документів до вмісту фосфатів в оброблених водах, обробку бажано проводити при стехіометричних співвідношеннях реагентів для більш повної реакції між компонентами. Перевагою фосфату натрію як реагенту для видалення іонів магнію можна вважати той факт, що в діапазоні рН 3,16 – 10,07 при $K = 1$ залишкова жорсткість коливається в межах 1,8 – 3,4 мг-екв/дм³. При цьому мінімальне значення залишкової жорсткості зафіксовано на рівні 0,75 мг-екв/дм³ при рН 10,07 та $K = 2$. При зниженні рН спостерігається стабільне зниження ефективності, хоча і не дуже суттєве. Так, при переході з лужного в кисле середовище залишкові концентрації іонів магнію зростають в 2 рази незалежно від значення коефіцієнта K . Подібні тенденції зберігаються і у випадку зміни початкової жорсткості води. Найбільша різниця спостерігається при значеннях $K \leq 1$, що пояснюється дефіцитом аніонів фосфату та неможливістю формування твердої фази стехіометричного складу. Проте, навіть при стехіометричному співвідношенні реагуючих речовин ($K = 1$) залишкова жорсткість обробленої води досить значна і коливається в межах 2,5 – 3 мг-екв/дм³. Подальше збільшення дози фосфату натрію дозволяє дещо знизити залишкову жорсткість обробленої води. Так, мінімальна залишкова жорсткість обробленої води при $K = 2,0$ зафіксована на рівні 0,7 мг-екв/дм³ при початковій жорсткості 22,9 мг-екв/дм³. Відмічено також зростання залишкової жорсткості обробленої води при зниженні початкової її жорсткості. Така ситуація викликана, на нашу думку, суттєвим збільшенням маси твердої фази та зростанням рН при збільшенні дози фосфату натрію. Суттєвою перевагою фосфату натрію в якості осаджувача іонів кальцію є той факт, що температура води практично не впливає на ефективність процесу в широкому діапазоні температур. Ця тенденція характерна і для іонів магнію. В діапазоні температур 5 – 70 °С ефективність пом'якшення залишається стабільною. Причому, тверда фаза формується відразу після зливання розчинів. Якщо врахувати високу ефективність фосфатів при видаленні іонів кальцію, то в цілому застосування фосфатів для пом'якшення води може бути допустимим за умови повного відділення утвореної твердої фази від води. Детальні дослідження ефективності відділення часток фосфату магнію відстоюванням чи фільтруванням так само важливі, як і самі процеси формування твердої фази.

Ключові слова: магній, пом'якшення, фосфати, видалення, гідроліз.

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2022.269815

* Corresponding author: r.yar@ukr.net

Received 02 December 2022; Accepted 9 December 2022

Постановка проблеми. Критична ситуація з якістю природних вод в багатьох регіонах планети змушує все більше уваги приділяти процесам очищення води та водопідготовки. Сьогодні попередньому очищенню підлягають практично всі поверхневі води та більша частина підземних вод. Значну частину забруднень, що зумовлюють цю глобальну проблему, є сполуки кальцію та магнію, котрі формують таку характеристику води як жорсткість. Жорсткість природних вод коливається в надзвичайно широких межах. Вона змінюється як з порами року, так і для різних водних об'єктів та різних територій. Для території України характерна тенденція збільшення жорсткості води в поверхневих водоймах в напрямку з північного заходу на південний схід. Так, якщо води Дніпра мають жорсткість на рівні 4 – 5 мг-екв/дм³, то в річках Приазов'я цей показник зростає до 15 – 30 мг-екв/дм³ [1]. Жорсткість води змінюється навіть в більш об'ємних водоймах. Так, якщо для вод Світового океану середня загальна жорсткість складає біля 130,5 мг-екв/дм³, то в Чорному та Каспійському морях вона знижується до 65,5 мг-екв/дм³ та 66,4 мг-екв/дм³ відповідно. В поверхневих водоймах магнієва жорсткість складає, зазвичай, 30 % загальної жорсткості, хоча в окремих регіонах (наприклад, Донбасу) може збільшуватися до 60 %, а для вод Світового океану – майже до 83 %. Тому проблема видалення іонів магнію з природних вод сьогодні, в умовах дефіциту якісних вод, надзвичайно загострюється та актуалізується.

Аналіз попередніх досліджень. Чинні нормативні документи України обмежують показник загальної жорсткості води для споживання людиною на рівні в 7 мг-екв/дм³ [2]. При цьому показники фізіологічної повноцінності мінерального складу питної води визначені для мінімальної загальної жорсткості на рівні 1,5 мг-екв/дм³, а вміст іонів магнію рекомендовано в межах 10 – 50 мг/дм³. Для промислових вод в деяких галузях вимоги до цього параметру води більш жорсткі. Так, харчова промисловість споживає воду з жорсткістю на рівні 0,1 – 0,2 мг-екв/дм³, а енергетика - взагалі на рівні 0,03 – 0,05 мг-екв/дм³ [3]. Тому значна частина природних вод потребує пом'якшення – видалення надмірної кількості іонів кальцію та магнію. Найбільшого поширення сьогодні набула содово – вапняна (натрієва) технологія пом'якшення води. Вона передбачає обробку жорсткої води на першому етапі карбонатом натрію для осадження іонів кальцію, а на другому - вапном для осадження іонів магнію [4]. Технологія потребує відстоювання та відділення твердої фази, коригування рН обробленої води від значень водневого показника 10,0 – 11,0 до нейтрального значення. Технологія не відрізняється значною ефективністю, оскільки навіть при температурі води 35 – 40 °С залишкова її жорсткість складає 0,5 – 1,0 мг-екв/дм³. Незважаючи на вказані недоліки, ця технологія вважається базовою для промислового використання, оскільки дозволяє пом'якшувати воду з широким діапазоном концентрацій іонів кальцію та магнію і споруджувати системи значної продуктивності.

Сучасне підвищення вмісту іонів кальцію та магнію в природних водах змушує передбачати системи пом'якшення в офісах та приватних будинках і квартирах, де реалізація содово – вапняної технології неможлива. Необхідна продуктивність таких систем невелика, тому найбільшого поширення в цій галузі отримали іонообмінні установки пом'якшення [5]. В якості регенераційних розчинів в таких установках використовують 6 – 8 %-ий розчин хлориду натрію, котрий після регенерації скидають в каналізаційні системи. Тому крім іонів кальцію та магнію скидається значно більша кількість хлориду натрію [6]. Значні об'єми води використовується для спущування та відмивання іонітів. Сумарно 20 – 30 % обробленої установкою води використовується на її обслуговування [7]. З кожним роком кількість таких малопотужних систем зростає і, відповідно, зростає їх негативний вплив на довкілля. До сьогодні пом'якшення води побутовими та офісними системами залишається невирішеною частиною наукової проблеми захисту довкілля від забруднення шкідливими речовинами. Цілком очевидно, що проблема давно чекає вирішення і з кожним роком її актуальність зростає.

Мета статті. На жаль, використання в побуті та офісах традиційної содово – вапняної технології як найбільш вивченої та поширеної є неможливим через необхідність забезпечення підвищених температур води, тривалого відстоювання для забезпечення формування твердої фази і характеризується досить низькою ефективністю. Проведені нами дослідження [8] показали, що ефективне видалення содово – натрієвим методом іонів кальцію при низьких температурах та без відстоювання можливе лише при 5 – 10 кратному перевищенні дози осаджувача в порівнянні із стехіометричним. Важливо також те, що необхідний процес освітлення обробленої води проходить нестабільно, інтенсивність осадження твердих часток низька, а залишковий уявний об'єм осаду потребує використання додаткових реагентів у вигляді коагулянтів чи флокулянтів. Мінімальна залишкова жорсткість води при цьому складає 0,6 мг-екв/дм³. Практично відсутні детальні дослідження щодо ефективності видалення іонів магнію шляхом їх гідролізу. Тому нами продовжено пошук прийнятних методів та реагентів для пом'якшення води в побутових та офісних системах. Дана робота присвячена вивченню ефективності видалення іонів магнію різними реагентами.

Методика роботи. Суть дослідження полягала в приготуванні модельних розчинів із різним вмістом іонів Mg^{2+} та обробці їх різними дозами реагентів при різних співвідношеннях компонентів та різних значеннях рН і температури. Причому, осадження проводили без відстоювання. Осад відфільтровували відразу після осадження на «синій стрічці» та визначали залишкову жорсткість розчину шляхом титрування з використанням еріхрому чорного Т та трилону Б.

Виклад основного матеріалу. Проведені дослідження показали, що, на відміну від карбонату кальцію [8], ефективне осадження іонів магнію можливе у вигляді інших нерозчинних сполук. Згідно [9], найбільш масовими малорозчинними чи нерозчинними у воді сполуками є сполуки магнію із фосфором. Їх досить багато з широким діапазоном розчинності. Але найбільш простим та поширеним є продукт гідролізу іонів магнію – гідроксид магнію. Саме у вигляді гідроксиду видаляються іони магнію в содово – вапняній технології, оскільки карбонат магнію має надто велику розчинність. З іншого боку, значення рН початку осадження $Mg(OH)_2$ при початковій концентрації іонів магнію 0,01 м складає 10,4, а значення повного осадження – 12,4 [9]. Як показали наші дослідження, видалення магнію у вигляді гідроксиду пов'язано із значними недоліками, оскільки таке значне збільшення рН потребує наступного його корегування після відділення осаду, що пов'язано із значними витратами реагентів. Як виявилось, навіть при початковій жорсткості 19,6 мг-екв/дм³ до рН 10,5 утворення твердої фази в об'ємі модельного розчину візуально не спостерігається (рис. 1). Для відчутного ефекту пом'якшення рН необхідно підтримувати на рівні 11 – 11,5. З іншого боку, позитивним є той факт, що з часом спостерігається освітлення обробленого розчину, що дозволяє розділяти тверду та рідку фази. В той же час, для систем малої та середньої продуктивності цей метод цілком непридатний, оскільки потребує додаткового етапу коригування рН обробленої води і пов'язаний із значною витратою реагентів.

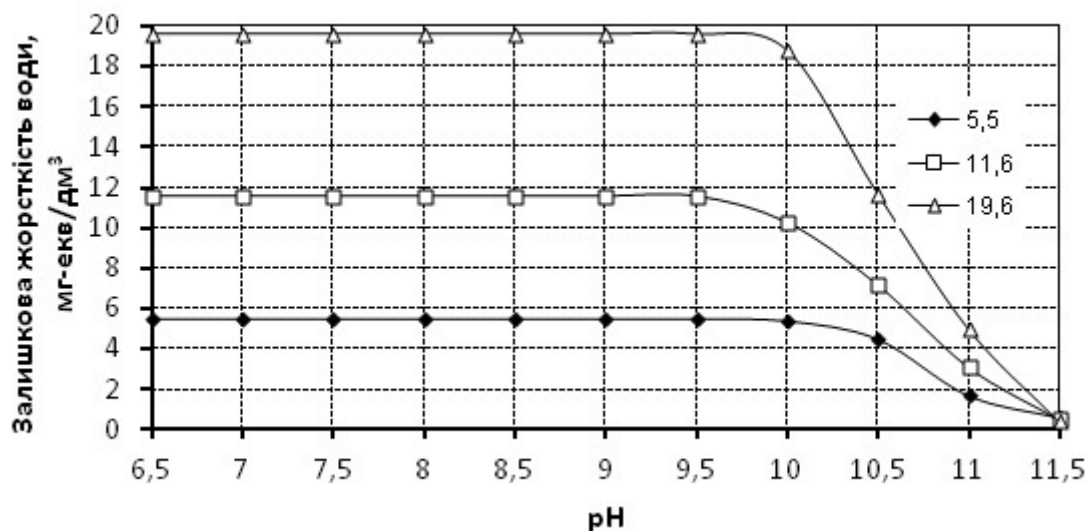
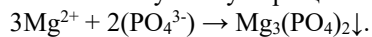


Рис. 1 – Залежність залишкової жорсткості води від рН при різних значеннях початкової жорсткості та температурі розчину 22 °С

Ще одним реагентом, використання якого досить часто пропонується в науковій літературі для осадження іонів магнію, є фосфати [6]. При цьому передбачається, що в розчині проходять реакції, котрі в загальному випадку можуть бути представлені в наступному спрощеному вигляді:



В результаті іони магнію зв'язуються в нерозчинну сполуку і можуть бути видалені із обробленої води. Приведене рівняння досить ідеалізоване, оскільки в процесі реакції може утворюватися досить багато проміжних сполук. Більш детально про них можна довідатися, наприклад у [10]. Як ми вже зазначали [8], з точки зору ефективності процесу пом'якшення фосфати кальцію більш придатні в якості осаджувача, ніж карбонати. Оскільки процеси пом'якшення передбачають одночасне видалення іонів кальцію та магнію, то очевидно, що аналогічні детальні дослідження варто провести і для фосфатів магнію.

Як було встановлено в результаті наших експериментів (рис. 2), зменшення магнієвої жорсткості з допомогою фосфатів виявилася менш ефективним, ніж у випадку видалення іонів кальцію. Навіть при рН 10,07 та $K = 2$ мінімальна залишкова жорсткість води не опускалася нижче 0,75 мг-екв/дм³ (у випадку з кальцієм – 0,1 – 0,2 мг-екв/дм³). При зниженні рН спостерігається стабільне зниження ефективності, хоча і не дуже суттєве. Так, при переході з лужного в кисле середовище залишкові концентрації іонів магнію зростають в 2 рази незалежно від значення коефіцієнта K . Якщо зважити на сучасні жорсткі вимоги до вмісту фосфатів у стічних водах, то варто орієнтуватися на стехіометричні співвідношення реагентів для більш повної реакції між компонентами. Як видно з рис. 2, в нейтральному середовищі при $K = 1$ залишкова жорсткість обробленої води може сягати 3 мг-екв/дм³ і більше. За інших умов (температура, значна початкова магнієва жорсткість) залишкова жорсткість може бути ще більшою, що суттєво знизить загальну ефективність процесу пом'якшення.

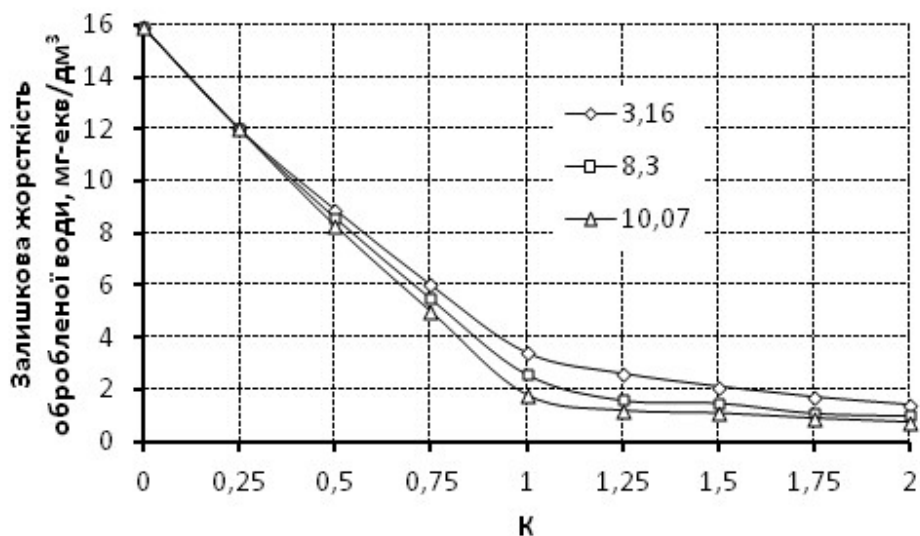


Рис. 2 – Залежність залишкової жорсткості води від коефіцієнта $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[Mg^{2+}, \text{мг-екв}]$ при різних значеннях рН та температурі розчину 22 °С

Подібні тенденції зберігаються і у випадку зміни початкової жорсткості води (рис. 3).

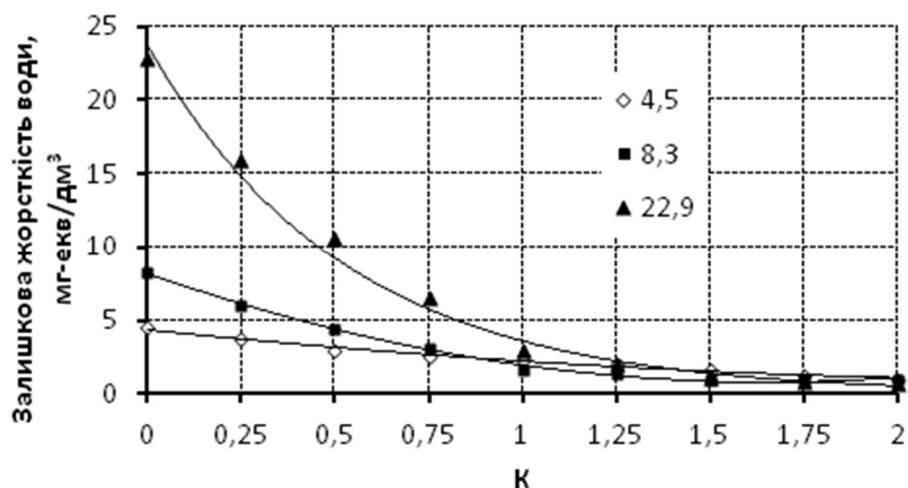


Рис. 3 – Залежність залишкової жорсткості води від коефіцієнта $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[Mg^{2+}, \text{мг-екв}]$ при різних значеннях початкової жорсткості, рН_п 6,58 та температурі розчину 21 °С

Найбільша різниця спостерігається при значеннях $K \leq 1$, що пояснюється дефіцитом аніонів фосфату та неможливістю формування твердої фази стехіометричного складу. Проте, навіть при стехіометричному співвідношенні реагуючих речовин ($K = 1$) залишкова жорсткість обробленої води досить значна і коливається в межах 2,5 – 3 мг-екв/дм³. Подальше збільшення дози фосфату натрію дозволяє дещо знизити залишкову жорсткість обробленої води. Так, мінімальна залишкова жорсткість обробленої води при $K = 2,0$ зафіксована на рівні 0,7 мг-екв/дм³ при початковій жорсткості 22,9 мг-екв/дм³. Відмічено також зростання залишкової жорсткості обробленої води при зниженні початкової її жорсткості. Так, за приведених умов при початковій жорсткості води 8,3 мг-екв/дм³ залишкова жорсткість зростає до 0,95 мг-екв/дм³, а при початковій жорсткості води 4,5 мг-екв/дм³ залишкова жорсткість зростає до 1,0 мг-екв/дм³. Така ситуація викликана, на нашу думку, суттєвим збільшенням маси твердої фази та зростанням рН при збільшенні дози фосфату натрію.

Суттєвою перевагою фосфату натрію в якості осаджувача іонів кальцію є той факт, що температура води практично не впливає на ефективність процесу в широкому діапазоні температур. Як видно з рис. 4, в діапазоні температур 5 - 70 °С ефективність пом'якшення залишається стабільною. Причому, тверда фаза формується відразу після зливання розчинів, що дозволяє відразу її фільтрувати перед використанням обробленої води. Цей факт надзвичайно важливий при пом'якшенні природних вод в умовах відсутності їх попереднього підігріву. Проведені нами вимірювання температури води в різні періоди року в київській мережів показали, що вона коливається, переважно, в межах 13 – 17 °С, але в зимовий період, особливо в умовах недостатнього опалення приміщень, може знижуватися до 8,5 °С.

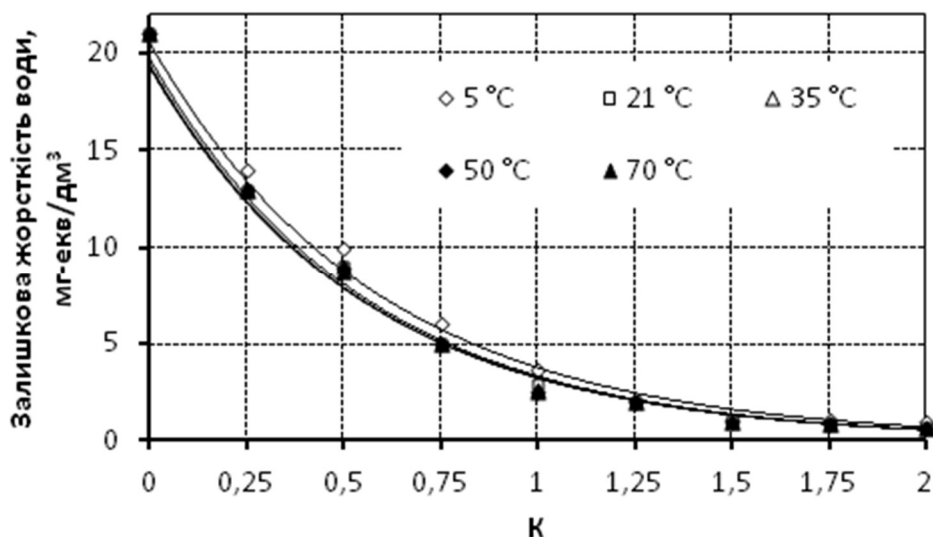


Рис. 4 – Залежність залишкової жорсткості води від коефіцієнту $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$ при різних значеннях температури розчину, початковій жорсткості 21 мг-екв/дм, рН 6,58

Висновки. Видалення іонів магнію є обов'язковим процесом технологій пом'якшення води. Традиційні технології не забезпечують достатньої ефективності без виконання особливих умов – нагрівання та коригування рН. Незважаючи на значні залишкові концентрації іонів магнію після обробки води фосфатами, використання їх більш прийнятне для систем малої та середньої продуктивності, оскільки дозволяє проводити пом'якшення за низьких температур та без відстоювання. Зафіксовано зростання залишкової жорсткості обробленої води при зниженні початкової її жорсткості, що ми пов'язуємо із суттєвим збільшенням маси твердої фази та зростанням рН при збільшенні дози фосфату натрію.

Перспективи подальших досліджень. Незважаючи на достатньо значну кількість пропозицій щодо застосування фосфатів в процесах пом'якшення, окремі аспекти та особливості до сьогодні детально не вивчені. Видалення з води одночасно іонів кальцію та магнію внесе корективи в окремі параметри процесу. Для використання фосфатів в системах малої та середньої продуктивності необхідно детально вивчити процеси фільтрування за різних умов, властивості утвореної твердої фази, крупність твердих часток і т.п. Не

включається також використання додаткових реагентів у вигляді коагулянтів та флокулянтів. Саме ці напрямки стануть основою наших подальших досліджень в цій галузі.

Список використаної літератури

1. Горєв Л. М., Пелешенко В. І., Хільчевський В. К. Гідрохімія України : підручник. Київ : Вища школа, 1995. 307 с.
2. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. [Чиний від 2022-04-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2010. Наказ № 400.
3. Рябчиков Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. М.: ДеЛи принт, 2004. 301 с.
4. Карелин В.А. Водоподготовка. Физико-химические основы процессов обработки воды : учебное пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 97 с.
5. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок. Москва: Энергия, 1980. 288 с.
6. Шаблій Т. О., Радовенчик В. М., Гомеля М. Д. Застосування нових реагентів і технологій в промисловому водоспоживанні. Київ : Інфодрук, 2014. 302 с.
7. Дикаревский В. С. Обработка воды для теплоэнергетических установок ж/д транспорта. Москва : Транспорт, 1986. 460 с.
8. Радовенчик Я. В., Гордієнко К. Ю., Радовенчик В. М., Крисенко Т. В. Особливості хімічного висадження іонів кальцію з розведених водних розчинів. // Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2022. №2. С. 72–78. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353>.
9. Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. Киев : Изд-во АН УССР, 1962. 659 с.
10. Василенко К. В. Одержання високочистих орто- і пірофосфатів натрію, калію, амонію та кальцію для використання в якості харчових добавок: дис. ... доктора філософії : 161. Дніпро, 2021. 199 с.

Yaroslav Radovenchik, Kateryna Hordiienko, Tamara Krysenko, Viacheslav Radovenchik

EFFICIENCY OF MAGNESIUM IONS REMOVAL FROM WATER IN PROCESSES OF ITS MITIGATION

Significant concentrations of calcium and magnesium ions in natural waters force the majority of domestic drinking and energy waters to undergo preliminary softening. Therefore, mitigation technologies are becoming particularly acute today, and research in this field is increasing every year. Since water hardness is determined by the total content of calcium and magnesium ions, these elements are the focus of such research.

Traditionally, it is believed that calcium ions are the first to be removed, and magnesium ions are less likely to form a solid phase. However, the effectiveness of softening technology depends equally on both cations. Therefore, sufficient attention should also be paid to magnesium ions. Sodium phosphate is considered a promising reagent in this direction. Its use in the processes of removing calcium ions allows to ensure the residual hardness of water at the level of 0.1 - 0.2 mg-eq/dm³ in a wide range of temperatures and hydrogen index. Detailed studies of the use of sodium phosphate in the processes of removing magnesium ions showed its insufficient efficiency.

The effectiveness of soda-sodium softening allows to ensure at pH 11.0 - 11.5 the residual hardness of water at the level of 0.4 - 0.6 mg-eq/dm³. But the need to adjust the hydrogen index and the high consumption of reagents make this technology unsuitable for widespread use. The determining factor in water softening processes using phosphate ions is the ratio between the concentrations of phosphate ions and magnesium ions $K = [PO_4^{3-}, \text{mg-eq}] / [Mg^{2+}, \text{mg-eq}]$. Taking into account the strict requirements of current regulatory documents for the content of phosphates in treated waters, it is desirable to carry out the treatment with stoichiometric ratios of reagents for a more complete reaction between the components. The advantage of sodium phosphate as a reagent for removing magnesium ions can be considered the fact that in the pH range of 3.16 - 10.07 at $K = 1$, the residual hardness ranges from 1.8 to 3.4 mg-eq/dm³. At the same time, the minimum value of the residual stiffness was recorded at the level of 0.75 mg-eq/dm³ at pH 10.07 and $K = 2$. As the pH decreases, a stable decrease in efficiency is observed, although it is not very significant. Thus, during the transition from an alkaline to an acidic medium, the residual concentration of magnesium ions increases by a factor of 2, regardless of the value of the coefficient K . Similar trends persist in the case of a change in the initial hardness of water. The biggest difference is observed at values of $K \leq 1$, which is explained by the deficiency of phosphate anions and the impossibility of forming a solid phase of stoichiometric composition.

However, even with a stoichiometric ratio of reactants ($K = 1$), the residual hardness of treated water is quite significant and ranges from 2.5 to 3 mg-eq/dm³. A further increase in the dose of sodium phosphate allows to slightly reduce the residual hardness of the treated water. Thus, the minimum residual hardness of treated water at $K = 2.0$ is fixed at the level of 0.7 mg-eq/dm³ with an initial hardness of 22.9 mg-eq/dm³. An increase in the residual hardness of the treated water with a decrease in its initial hardness was also noted. This situation is caused, in our opinion, by a significant increase in the mass of the solid phase and an increase in pH with an increase in the dose of sodium phosphate.

A significant advantage of sodium phosphate as a precipitator of calcium ions is the fact that the temperature of the water practically does not affect the efficiency of the process in a wide range of temperatures. This trend is also characteristic of magnesium ions. In the temperature range of 5 - 70 °C, the softening efficiency remains stable. Moreover, the solid phase is formed immediately after draining the solutions. If we take into account the high efficiency of phosphates in removing calcium ions, then in general, the use of phosphates for softening water can be permissible, provided that the formed solid phase is completely separated from the water. Detailed studies of the efficiency of separation of magnesium phosphate particles by settling or filtering are as important as the processes of solid phase formation.

Keywords: magnesium, softening, phosphates, removal, hydrolysis

References

1. Horev L. M., Peleshenko V. I., Khilchevskiy V. K. (1995), *Hidrokhimiya Ukrayiny* [Hydrochemistry of Ukraine], Kyiv.
2. DSanPiN 2.2.4-171-10, *Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoj dlia spozhyvannia liudynoiu* [Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption], Nakaz Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy 12.05.2010 r. № 400.
3. Ryabchikov B. E. (2004), *Sovremennye metody podgotovki vody dlya promyshlennogo i bytovogo ispolzovaniya* [Modern methods of water treatment for industrial and domestic use], Moscow.
4. Karelin V.A. (2012), *Vodopodgotovka. Fiziko-himicheskie osnovy processov obrabotki vody: uchebnoe posobie* [Water treatment. Physical and chemical bases of water treatment processes: textbook], Tomsk.
5. Lifshic O. V. (1980), *Spravochnik po vodopodgotovke kotelnyh ustanovok : spravochnik* [Handbook for water treatment of boiler plants], Moscow.
6. Shablii T. O., Radovenchyk V. M., Homelia M. D. (2014), *Zastosuvannya novykh reahentiv i tekhnolohii v promyslovomu vodospozhyvanni* [Application of new reagents and technologies in industrial water consumption], Kyiv.
7. Dikarevskij V. S., Karavaev I. I. (1986), *Obrabotka vody dlya teploenergeticheskikh ustanovok zh/d t ransporta* [Water treatment for thermal power plants of railway transport], Moscow.
8. Radovenchyk Ya. V., Hordiienko K. Yu., Krysenko T. V., Radovenchyk V. M. (2022), *Osoblyvosti khimichnoho vysadzhennia ioniv kaltsiiu z rozvedenykh vodnykh rozchyniv* [Peculiarities of chemical deposition of calcium ions from dilute aqueous solutions] // *Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving», №2. S. 72–78. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353>.*
9. Goronovsky I. T., Nazarenko Yu. P., Nekryach E. F. (1962), *Short reference book on chemistry* [Brief reference book on chemistry], Kyiv.
10. Vasylenko K. V. (2021), *Production of highly pure ortho- and pyrophosphates of sodium, potassium, ammonium and calcium for use as food additives* [Obtaining highly pure ortho- and pyrophosphates of sodium, potassium, ammonium and calcium for use as food additives]: dissertation. ... doctor of philosophy: 161. Dnipro.