

УДК 628.164-926.41

ВОЩЕНКО Б. А., РАДОВЕНЧИК В. М.\*, КАРАВАЦЬКА В. В., РАДОВЕНЧИК Я. В.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ОСОБЛИВОСТІ ПОМ'ЯКШЕННЯ ВОДИ В ДВОКАМЕРНОМУ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІ

Сучасний стан гідросфери в значній мірі визначається антропогенною діяльністю людини. Недостатньо очищені або взагалі не очищені стічні води при скидї у поверхневі водойми суттєво погіршують якість води в них та перешкоджають їх прямому споживанню і використанню. Одним з важливих показників природних вод є їх жорсткість, підвищені рівні якої негативно впливають як на окремі органи людини, так і на можливість безпечної експлуатації технологічного обладнання в багатьох технологічних процесах. Традиційною технологією пом'якшення води сьогодні вважається реагентна содово-вапняна чи содово-натрієва технологія, суть котрої полягає в двоетапній обробці жорсткої води спочатку карбонатом кальцію, а потім – вапном чи гідроксидом натрію. Головним недоліком цієї технології є низька ефективність при звичайних температурах та значна витрата реагентів. Більш ефективною сьогодні вважається іонообмінна технологія на основі катіонітів, але її використання супроводжується скидом в довкілля значних об'ємів концентрованих розчинів хлориду натрію з домішками сполук кальцію та магнію. В результаті формується замкнений кругообіг хлоридів натрію, кальцію і магнію. Тому практично завжди існувала потреба в зниженні масштабів цього кругообігу та скороченні об'ємів забруднень, що скидаються в гідросферу. Одним з можливих перспективних процесів пом'якшення жорстких вод сьогодні вважається електрохімічна технологія, котра дозволяє шляхом обробки розчинів електричним струмом при відповідних умовах корегувати водневий показник, трансформуючи іони кальцію та магнію в нерозчинні сполуки з їх подальшим відділенням від рідкої фази. Проведені нами дослідження показали, що для підтримання необхідної ефективності процесу пом'якшення значення водневого показника для трансформації іонів магнію необхідно тримати на рівні 11,5. Для іонів кальцію аналогічний показник потребує значення в 13,0 одиниць. Експерименти з двокамерним електролізером з діафрагмою показали, що визначальними в цьому процесі є подана на електроди напруга, котра визначає щільність струму на електродах, термін електролізу та початкова жорсткість води. Встановлено, що для отримання в катодній камері необхідного значення водневого показника необхідно підвищеної жорсткості води та відповідної її провідності. Так, для іонів магнію прийнятні результати отримані вже при їх вмісті 10 мг-екв/дм<sup>3</sup> з додаванням 10 мг-екв/дм<sup>3</sup> сульфату натрію. Для іонів кальцію досягнення необхідного рівня водневого показника виявилось дуже проблематичним і в зазначених умовах він не перевищував 12,12, що недостатньо для ефективного пом'якшення води. Таким чином, видалення з розчину іонів кальцію у вигляді його гідроксиду електрохімічними методами досить проблематично і можливо, може бути реалізовано в електролізерах особливої конструкції або у вигляді інших сполук, як, наприклад, карбонату кальцію.

**Ключові слова:** пом'якшення води, жорсткість, електроліз, електролізер з діафрагмою, іони кальцію, іони магнію

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2025.325848

\* Corresponding author: dokeco@ukr.net

Received 22 January 2025; Accepted 27 February 2025

**Постановка проблеми.** Теперішній стан переважної частини поверхневих водойм України не відповідає вимогам нормативних документів, а їх води потребують додаткового очищення перед споживанням [1–3]. Найчастіше нормативним значенням чинних документів не відповідають такі параметри природних вод як мінералізація та жорсткість. Такі води не лише непридатні для споживання населенням, але й досить часто не можуть використовуватися промисловими підприємствами. Особливо характерна така ситуація для східних та південних регіонів України, де у поверхневі водойми масово скидаються шахтні води підвищеної жорсткості та мінералізації. Причому, в зазначених регіонах сьогодні фіксується стійка тенденція до росту мінералізації та жорсткості води. Проблеми підвищеної мінералізації та жорсткості характерні і для підземних вод в окремих регіонах України. Варто також акцентувати увагу на тому факті, що постійне

споживання води підвищеної жорсткості може негативно впливати на опорно-рухову та серцево-судинну системи людини, а сполуки кальцію та магнію у вигляді каменів можуть відкладатися у нирках і жовчному міхурі. Катастрофічне зменшення запасів якісної природної води підсилює існуючі проблеми, актуалізує технології пом'якшення води, привертаючи до них все більше уваги.

**Аналіз попередніх досліджень.** Жорсткість води визначається, в основному, вмістом іонів кальцію та магнію. Згідно чинних нормативних документів України жорсткість води для споживання людиною обмежується рівнем в 7 мг-екв/дм<sup>3</sup> [4]. Для харчової промисловості використовується вода з рівнем жорсткості в межах 0,1–0,2 мг-екв/дм<sup>3</sup>, а для енергетичних установок прийнятно вважається вода з жорсткістю 0,03–0,05 мг-екв/дм<sup>3</sup> [5; 6]. Традиційною технологією пом'якшення води сьогодні вважається содово-вапняна технологія. Вона передбачає двоетапну обробку жорсткої води: на першому етапі – карбонатом натрію для зв'язування іонів кальцію, на другому етапі – вапном для зв'язування іонів магнію [7, 8]. Далі тверду фазу відділяють відстоюванням або фільтрацією і у фільтраті встановлюють нейтральний рівень рН. Описаною технологією залишкова жорсткість води може бути доведена до 0,5–1,0 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Для отримання найвищої ефективності технології температуру води необхідно підтримувати в межах 35–40 °С. Сьогодні цей метод набув промислових масштабів, хоча дотепер багато його аспектів залишаються недостатньо дослідженими.

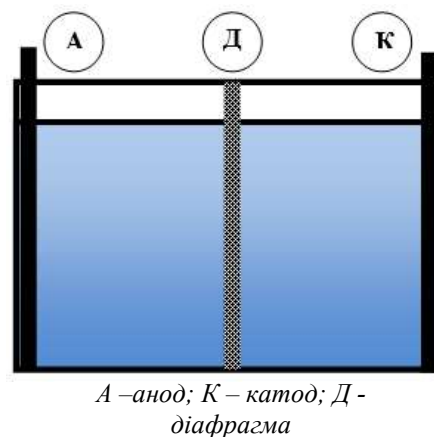
При пом'якшенні води в невеликих об'ємах найчастіше використовують установки, в основі роботи котрих покладено процеси іонного обміну [9–11]. Такі установки не потребують складного обслуговування, здатні тривалий час функціонувати в автоматичному режимі. До недоліків таких установок варто віднести утворення регенераційних розчинів, що містять високі концентрації хлориду натрію та незначні концентрації іонів кальцію і магнію. Значні експлуатаційні витрати пов'язані із використанням 20–30 % обробленої води на обслуговування установки — промивання, спущування та регенерацію іонітів [12–14]. Головний екологічний результат експлуатації таких установок – засолення поверхневих водоемів хлоридом натрію та вилученими з води іонами кальцію та магнію [15]. Очевидно, що існування такого замкнутого циклу солей змусить найближчим часом не лише пом'якшувати природну воду, але й передбачати її знесолення.

Обидві описані технології характеризуються низькою ефективністю та значним забрудненням навколишнього середовища. З іншого боку, давно відомо про можливість пом'якшення води електрохімічними методами. При цьому основною особливістю технології є використання електролізерів різних конструкцій з діафрагмою чи іонообмінною мембраною. Разом з тим, незважаючи на достатню кількість наукових публікацій, практичне використання технології в промислових масштабах не спостерігається. І чи не основним фактором тут є значні затрати електричної енергії при великих об'ємах води та невелика продуктивність вже розробленого обладнання. Для систем малої та середньої продуктивності (побутові та офісні системи) затрати електрики та незначні (в порівнянні з промисловими) витрати води змушують по іншому подивитися на використання електрохімічних методів в цій галузі.

Зважаючи на викладене вище, **основною метою** наших досліджень було визначення можливості та ефективності використання електролізерів відповідної конструкції для пом'якшення води в системах малої та середньої продуктивності.

**Методика роботи.** Вивчення ефективності електрохімічного пом'якшення води проводили в двокамерному електролізері з використанням в якості діафрагми тканини «хлорин» (рис. 1). Катод був виготовлений з нержавіючої сталі, анод виготовляли з титану або свинцю (у випадку використання для приготування модельних розчинів сульфатів). Кожна камера вміщувала 50 см<sup>3</sup> модельного розчину при площі кожного електрода 0,2 дм<sup>2</sup>. Максимальна відстань між електродами становила 3 см, а діафрагма встановлювалася посередині між ними. Для живлення електролізера використовували блок постійного струму із діапазоном зміни напруги 0 – 15 В.

В ході досліджень модельний розчин об'ємом 0,1 дм<sup>3</sup> заливали в обидві камери електролізера і під'єднували електроди до джерела стабілізованої напруги постійного струму. В процесі електролізу з камер відбирали проби та визначали їх рН, електропровідність і



А – анод; К – катод; Д –  
діафрагма

**Рис. 1 – Двокамерний електролізер для вивчення зміни параметрів розчинів в процесі електролізу**

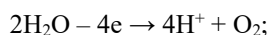
повертали в електролізер для продовження процесу. Додатково в процесі електролізу фіксували зміну струму при підтриманні напруги постійною.

#### Виклад основного матеріалу.

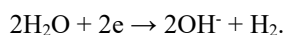
Основною метою процесів пом'якшення води є видалення з водного середовища іонів кальцію та магнію. Причому, від реагентної технології електрохімічна відрізняється лише тим, що регулювання рН відбувається шляхом пропускання через розчин електричного струму.

При наявності діафрагми в електролізері відбувається підвищення кислотності в анодній камері та ріст водневого показника в катодній камері за рахунок наступних реакцій [16]:

- на аноді відбувається окислення води з утворенням молекулярного кисню та іонів водню. Останнє викликає зниження рН:



- на катоді спостерігається відновлення молекул води з утворенням молекулярного водню та іонів  $\text{OH}^-$  і фіксується ріст рН:



Таким чином, пропускаючи розчин через катодну камеру, можливо встановити умови, що виключать гідроліз іонів кальцію та магнію і, відповідно, пом'якшення води. Як показали наші експерименти з розчинами хлоридів кальцію і магнію з початковою жорсткістю 23 мг-екв/дм<sup>3</sup> (рис. 2), для обох іонів ці умови дуже різняться. Так, якщо для іонів магнію при рН > 11,5 практично всі іони переходять в тверду фазу, то для іонів кальцію для повного гідролізу рівень рН повинен бути близьким до 13,0.

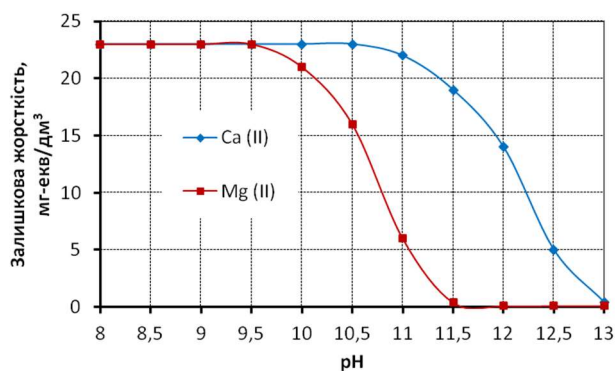


Рис. 2 – Ступінь гідролізу іонів кальцію та магнію в залежності від водневого показника

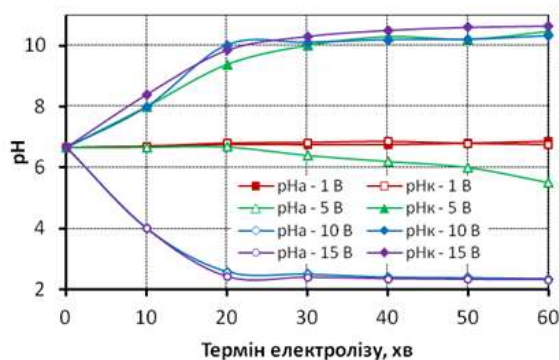


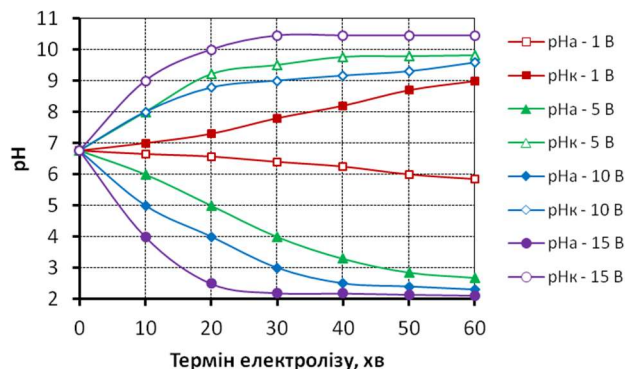
Рис. 3 – Залежність рН в катодній (рН<sub>к</sub>) та анодній (рН<sub>а</sub>) камерах від терміну електролізу та напруги на електродах при початковому вмісті іонів  $\text{Mg}^{2+}$  10 мг-екв/дм<sup>3</sup>

Для визначення можливості досягнення таких умов в електролізерах даної конструкції та основних факторах впливу на ефективність пом'якшення розчинів було проведено наступний цикл експериментів з модельними розчинами сульфату магнію та сульфату кальцію. Як видно з рис. 3, при початковій магнієвій жорсткості розчину 10 мг-екв/дм<sup>3</sup> та напрузі на електродах 1 В процес електролізу практично не відбувається і суттєвої зміни рН в камерах не спостерігається. Середня питома щільність струму за таких умов складає 5 мкА/дм<sup>2</sup>, тому чекати якихось суттєвих змін в процесі електролізу не варто. Збільшення напруги на електродах до 5 В, 10 В та 15 В дозволяє протягом 20 хв досягнути рН в катодній камері більше 10 та практично стабілізувати цей рівень. Продовження терміну електролізу суттєво на ріст рН не впливає.

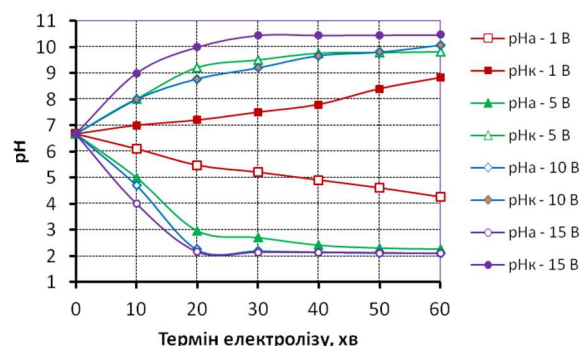
Ще одним фактором, що впливає на рівень рН в катодній камері, є початковий вміст іонів магнію в модельному розчині. Збільшення початкової жорсткості модельного розчину в два рази дозволяє стабільно отримувати через 30 хв. електролізу водневий показник на рівні 10,42 одиниць (рис. 4). Подальше збільшення початкової магнієвої жорсткості до 35 мг-екв/дм<sup>3</sup> суттєво на ріст рН не впливає і до кінця першої години електролізу становить 10,46 одиниць (рис. 5).

Звичайно, модельні розчини, приготовлені на дистильованій воді, мають низьку електропровідність та забезпечують низьку щільність струму. Реальні природні води завжди мінералізовані, тому їх провідність значно більша, що дозволяє за тих же умов електролізу забезпечувати в катодній камері необхідний для осадження іонів магнію рівень водневого показника (рис. 6). При додаванні до модельного розчину

10 мг-екв/дм<sup>3</sup> сульфату натрію (біля 710 мг/дм<sup>3</sup>) вже за 14 хв. в розчині рН зростає вище 11, що цілком достатньо для повного переходу іонів магнію в Mg(OH)<sub>2</sub> і забезпечення можливості відділення його від рідкої фази. Конкретні параметри електролізу підбираються для конкретної конструкції електролізера та конкретного хімічного складу води, що пом'якшується.

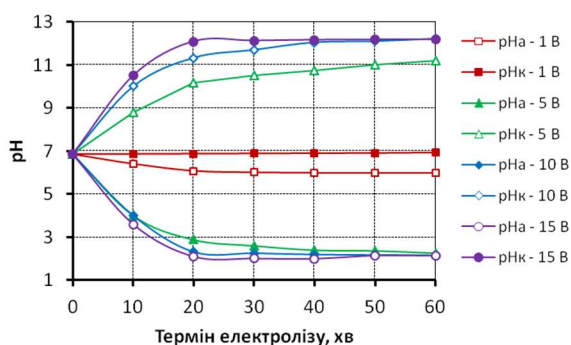


**Рис. 4 – Залежність рН в катодній (рН<sub>к</sub>) та анодній (рН<sub>а</sub>) камерах від терміну електролізу та напруги на електродах при початковому вмісті іонів Mg<sup>2+</sup> 20 мг-екв/дм<sup>3</sup>**

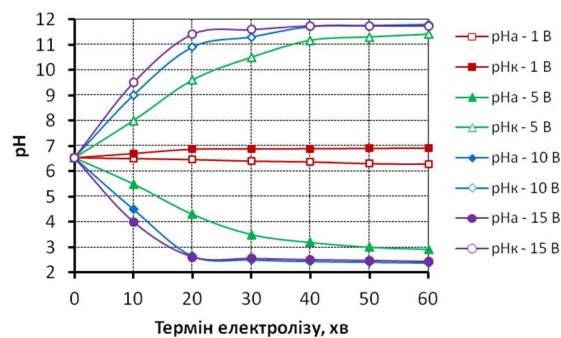


**Рис. 5 – Залежність рН в катодній (рН<sub>к</sub>) та анодній (рН<sub>а</sub>) камерах від терміну електролізу та напруги на електродах при початковому вмісті іонів Mg<sup>2+</sup> 35 мг-екв/дм<sup>3</sup>**

Аналогічні дослідження, проведені з розчинами сульфату кальцію різної концентрації показали, що в даному випадку ситуація дещо гірша. Як видно з рис. 7, при напрузі на електродах 1 В ніяких суттєвих змін у властивостях розчинів не спостерігається. При 15 В питома щільність струму на електродах зростає до 0,05 А/дм<sup>2</sup> і вже протягом 20 хв в катодній камері рН встановлюється на рівні 11,42. Подовження терміну електролізу дозволяє підвищити рН до 11,76, що є максимумом для даного циклу досліджень.



**Рис. 6 – Залежність рН в катодній (рН<sub>к</sub>) та анодній (рН<sub>а</sub>) камерах від терміну електролізу та напруги на електродах при початковому вмісті іонів Mg<sup>2+</sup> 10 мг-екв/дм<sup>3</sup> та 10 мг-екв/дм<sup>3</sup> сульфату натрію**



**Рис. 7 – Залежність рН в катодній (рН<sub>к</sub>) та анодній (рН<sub>а</sub>) камерах від терміну електролізу та напруги на електродах при початковому вмісті іонів Ca<sup>2+</sup> 10 мг-екв/дм<sup>3</sup>**

Подальше збільшення початкової концентрації іонів кальцію до 20 мг-екв/дм<sup>3</sup> (рис. 8) кардинально на ситуацію не впливає. Максимальне значення рН в катодній камері вже через 40 хв електролізу сягає 11,94 і залишається стабільним до кінця циклу досліджень. А як видно із рис. 1, цього далеко недостатньо для ефективного видалення іонів кальцію. Більше того, навіть насичений розчин сульфату кальцію (рис. 9) дозволяє збільшити водневий показник в катодній камері лише до 12,12. Далі процес стабілізується і протягом проведення електролізу ще 40 хв суттєвих змін не спостерігається. Як видно з рис. 7–9, визначальним для електролізу розчинів сульфату кальцію є термін процесу в 20 хв. Саме протягом цього періоду значення водневого показника в катодній камері змінюється найбільш інтенсивно та стабілізується.



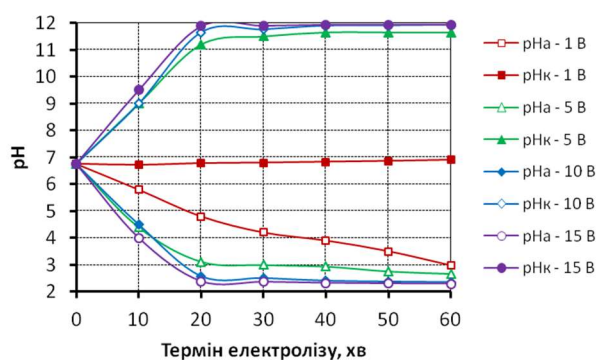


Рис. 8 – Залежність рН в катодній (рН<sub>к</sub>) та анодній (рН<sub>а</sub>) камерах від терміну електролізу та напруги на електродах при початковому вмісті іонів Ca<sup>2+</sup> 20 мг-екв/дм<sup>3</sup>

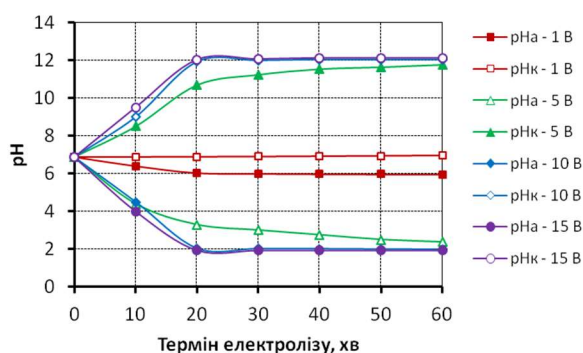


Рис. 9 – Залежність рН в катодній (рН<sub>к</sub>) та анодній (рН<sub>а</sub>) камерах від терміну електролізу та напруги на електродах при початковому вмісті іонів Ca<sup>2+</sup> 32,3 мг-екв/дм<sup>3</sup>

Навіть спроба підвищити водневий показник за рахунок збільшення мінералізації розчину шляхом додавання сульфату натрію не увінчалася успіхом (рис. 10). Максимальне значення рН в катодній камері не перевищувало рівня в 12,12 і так само формувалося протягом 20 хв електролізу.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволяють зробити кілька важливих висновків. По-перше, технологія електропом'якшення дозволяє видаляти іони магнію (II) з водного середовища у вигляді Mg(OH)<sub>2</sub>. Залишається питання щодо приведених енергетичних затрат такого процесу пом'якшення. По-друге, неможливо реалізувати видалення іонів кальцію у вигляді Ca(OH)<sub>2</sub>. Для реалізації процесу необхідно використовувати інші сполуки, що можуть переводити іони кальцію в твердий стан при більш низьких значеннях водневого показника. Очевидно, що такою сполукою може бути карбонат кальцію. Більшість природних вод завжди містять деяку кількість карбонатів чи гідрокарбонатів. А з цього випливає, що в умовах пом'якшення природних вод іони кальцію можна видаляти з водного середовища саме у вигляді карбонату. Як показують наші експерименти, при початковій кальцієвій жорсткості розчину 23 мг-екв/дм<sup>3</sup>, температурах вище 20 °С і рН 8 залишкова жорсткість при формуванні в розчині карбонату кальцію відповідає вимогам нормативних документів на питну воду. Тому саме в цьому напрямку будуть продовжені наші дослідження.

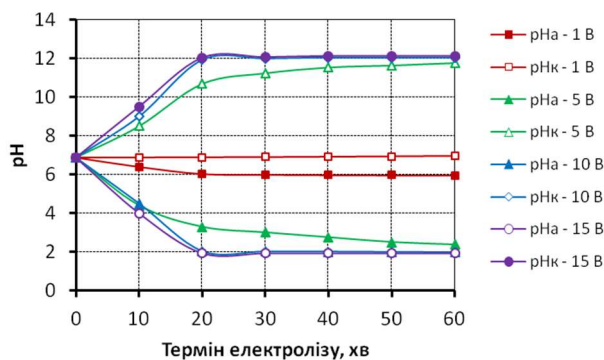


Рис. 10 – Залежність рН в катодній (рН<sub>к</sub>) та анодній (рН<sub>а</sub>) камерах від терміну електролізу та напруги на електродах при початковому вмісті іонів Ca<sup>2+</sup> 10 мг-екв/дм<sup>3</sup> та 10 мг-екв/дм<sup>3</sup> сульфату натрію

#### Список використаної літератури

1. 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.
2. Аліпов А. Н., Мягкий Д. Д., Янковська Є. В. Водозабезпечення населення, промисловості та сільського господарства Донбасу. Використання власних ресурсів // Вода і водоочисні технології. – 2007. – №4. – с. 17–22.
3. Goncharuk V. V., Kucheruk D. D., Skubenko V. F., Badekha V. P., Kochkodan V. M. Prospect of baromembrane desalination of brackish waters of south of Ukraine // Desalination. – 2001. – Vol. 139. – p. 327–331.
4. ДСанПіН 2.2.4-171-10 "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" - Наказ Міністерства охорони здоров'я України 12.05.2010 р. № 400.

5. Орлов В. О. Водопостачання промислових підприємств: Навчальний посібник / В. О. Орлов, Л. Л. Литвиненко, А. М. Орлова. — К. : Знання, 2014. — 278 с.
6. Долінський А. А., Ободович О. М., Сидоренко В. В., Лимар А. Ю. Особливості водопідготовки для котельних / Теплофізика та теплоенергетика, 2021, т. 43, № 4, с. 17–24.
7. Запольский, А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води – К. : Вища школа, 2005 – 612 с.
8. Hasson D, Cornel A (2017) Effect of residence time on the degree of CaCO<sub>3</sub> precipitation in the presence of an anti-scalant [J]. Desalination, 401: 64–67.
9. Fischer L, Hartmann S S, Maljusch A, et al. (2023) The influence of anion-exchange membrane nanostructure onto ion transport: Adjusting membrane performance through fabrication conditions [J]. Journal of Membrane Science, 669: 121306.
10. Гомеля І. М. Оцінка ефективності катіонітів КУ–2–8 і AqualiteK-100FC при помякшенні вод в присутності іонів заліза / І. М. Гомеля, Ю. А. Омельчук, В. М. Радовенчик // Екотехнології та ресурсозбереження. – 2008. – № 3. – С. 62–65.
11. Тихонова І. Проблема використання іонообмінних матеріалів у цеху водопідготовки промислових підприємств / І. Тихонова, О. Мацієвська // Ринок інсталяцій. – 2004. – № 9. – С. 22–23.
12. Іонообмінне очищення води від нітратів при створенні енергоефективних технологій демінералізації води / Трус І. М., Гомеля М. Д., Крисенко Т. В., Воробйова В. І. // Стратегії сталого розвитку: на шляху до сильнішої громади: матеріали науково-практичної конференції, 21 жовтня 2016 р., м. Северодонецьк. – Северодонецьк, 2016. – С. 272–274.
13. Айрапетян Т. С. Водне господарство промислових підприємств: навч. посібник – Харків : ХНАМГ, 2010. – 280 с.
14. Назаренко О. С. Вивчення процесу регенерації відпрацьованого катіоніту з установки помякшення води у виробництві бензену на РКХЗ "Заря" / Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2015, № 7 (224). – с. 32–36.
15. Шаблій Т. О., Радовенчик В. М., Гомеля М. Д. Застосування нових реагентів в промисловому водоспоживанні. – К.: Інфодрук, 2014. – 302 с.
16. Филипчук В. Л. Електрохімічне пом'якшення води в діафрагменному електролізері / Східно-Європейський журнал передових технологій, 2017. – № 2/6 (86). – С. 16–24.

---

**Bohdan Voshchenko, Vyacheslav Radovenchyk, Veronika Karavats'ka, Yaroslav Radovenchyk**

#### **FEATURES OF WATER SOFTENING IN A TWO-CHAMBER ELECTROLYZER**

*The current state of the hydrosphere is largely determined by human anthropogenic activity. Insufficiently treated or not treated at all wastewater when discharged into surface water bodies significantly deteriorates the quality of water in them and prevents their direct consumption and use. One of the important indicators of natural waters is their hardness, the increased levels of which negatively affect both individual human organs and the possibility of safe operation of technological equipment in many technological processes. The traditional water softening technology today is considered to be the reagent soda-lime or soda-sodium technology, the essence of which is the two-stage treatment of hard water first with calcium carbonate, and then with lime or sodium hydroxide. The main disadvantage of this technology is low efficiency at ordinary temperatures and significant consumption of reagents. Today, ion exchange technology based on cation exchangers is considered more effective, but its use is accompanied by the discharge into the environment of significant volumes of concentrated sodium chloride solutions with admixtures of calcium and magnesium compounds. As a result, a closed cycle of sodium, calcium and magnesium chlorides is formed. Therefore, there has always been a need to reduce the scale of this cycle and reduce the volume of pollutants discharged into the hydrosphere. One of the possible promising processes for softening hard water today is electrochemical technology, which allows, by treating solutions with electric current under appropriate conditions, to correct the hydrogen index, transforming calcium and magnesium ions into insoluble compounds with their subsequent separation from the liquid phase. Our studies have shown that to maintain the necessary efficiency of the softening process, the value of the hydrogen index for the transformation of magnesium ions must be kept at 11.5. For calcium ions, a similar indicator requires a value of 13.0 units. Experiments with a two-chamber electrolyzer with a diaphragm have shown that the voltage applied to the electrodes, which determines the current density on the electrodes, the electrolysis time and the initial water hardness, are decisive in this process. It has been established that in order to obtain the required value of the hydrogen indicator in the cathode chamber, increased water hardness and its corresponding conductivity are necessary. Thus, for magnesium ions, acceptable results were obtained already at their content of 10 mg-eq/dm<sup>3</sup> with the addition of 10 mg-eq/dm<sup>3</sup> of sodium sulfate. For calcium ions, achieving the*

required level of the hydrogen indicator turned out to be very problematic and under the specified conditions it did not exceed 12.12, which is insufficient for effective water softening. Thus, the removal of calcium ions from a solution in the form of its hydroxide by electrochemical methods is quite problematic and can perhaps be implemented in specially designed electrolyzers or in the form of other compounds, such as calcium carbonate.

**Keywords:** water softening, hardness, electrolysis, diaphragm electrolyzer, calcium ions, magnesium ions

### References

1. Radovenchyk, Ya. V., Hordiienko, K. Yu., Radovenchyk, V. M., Krysenko, T. V. (2022). Osoblyvosti khimichnoho osadzhennya ioniv kal'tsiyu z rozbavlenykh vodnykh rozchyniv [Features of Chemical Precipitation of Calcium Ions from Dilute Aqueous Solutions]. *Visnyk Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institut. Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*. no. 2 (21). pp. 72–78. doi: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353> (Ukr.)
2. Alipov A. N., Myahkyi D. D., Yankovska Ye. V. (2007). Vodopostachannya naselennya, promyslovosti ta sil's'koho hospodarstva Donbasu. Vykorystannya vlasnykh resursiv [Water Supply for the Population, Industry, and Agriculture of Donbas. Utilization of Own Resources]. *Voda ta vodoochysni tekhnolohiyi*. no. 4. pp. 17–22.
3. Goncharuk V. V., Kucheruk D. D., Skubenko V. F., Badekha V. P., Kochkodan V. M. (2001). Prospect of Baromembrane Desalination of Brackish Waters of South of Ukraine. *Desalination*. vol. 139, article 00326. doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00326-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00326-5)
4. DSanPiN 2.2.4-171-10. (2010). Hihiyenichni vymohy do vody pytnoyi, pryznachenoyi dlya prozhyvannya lyudey [Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption]. *Order of the Ministry of Health of Ukraine*. dated May 12. no. 400.
5. Orlov V. O., Lytvynenko L. L., Orlova A. M. (2014). Vodopostachannya promyslovykh pidpryyemstv [Water Supply of Industrial Enterprises]. Kyiv: Znannia. 278 p.
6. Dolinsky A. A., Obodovych O. M., Sydorenko V. V., Lymar A. Yu. (2021). Osoblyvosti vodopidhotovky dlya kotelen [Features of Water Treatment for Boiler Houses]. *Teplofizyka i teploenerhetyka*. vol. 43, no. 4. pp. 17–24. doi: <https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.2>
7. Zapolsky A. K. (2005). Vodopostachannya, vodovidvedennya ta yakist' vody [Water Supply, Sewerage, and Water Quality]. Kyiv: Vyshcha Shkola. 612 p.
8. Hasson D., Cornel A. (2017). Effect of Residence Time on the Degree of CaCO<sub>3</sub> Precipitation in the Presence of an Antiscalant. *Desalination*. vol. 401. pp. 64–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.06.006>
9. Fischer L., Hartmann S. S., Maljusch A., et al. (2023). The Influence of Anion-Exchange Membrane Nanostructure on Ion Transport: Adjusting Membrane Performance through Fabrication Conditions. *Journal of Membrane Science*. vol. 669 article 121306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121306>
10. Homelia I. M., Omelchuk Yu. A., Radovenchyk V. M. (2008). Otsinka efektyvnosti kationitiv KU–2–8 ta Akvalayt K-100FTS dlya pom'yakshennya vody v prysutnosti ioniv zaliza [Evaluation of the Efficiency of Cation Exchangers KU–2–8 and Aqualite K-100FC in Water Softening in the Presence of Iron Ions]. *Ekotekhnolohiyi ta resursozberezhennya*. no. 3. pp. 62–65.
11. Tykhonova I., Matsievska O. (2004). Problema vykorystannya ionoobminnykh materialiv u vodoochysnykh tsekhakh promyslovykh pidpryyemstv [The Problem of Using Ion-Exchange Materials in the Water Treatment Shop of Industrial Enterprises]. *Rynok instalyatsiy*. no. 9. pp. 22–23.
12. Trus I. M., Homelia M. D., Krysenko T. V., Vorobyova V. I. (2016). Ionoobminne ochyshchennya vody vid nitrativ u stvorenni enerhoefektyvnykh tekhnolohiy demineralizatsiyi vody [Ion-Exchange Purification of Water from Nitrates in Creating Energy-Efficient Technologies of Water Demineralization]. *Strategies for Sustainable Development: On the Way to a Stronger Community: Proceedings of Scientific and Practical Conference*. Sievierodonetsk. pp. 272–274.
13. Ayrapetyan T. S. (2010). Vodne hospodarstvo promyslovykh pidpryyemstv [Water Management of Industrial Enterprises]. Kharkiv: KhNAMG. 280 p.
14. Nazarenko O. S. (2015). Doslidzhennya protsesu regeneratsiyi vidprats'ovanoho kationitu z ustanovky pom'yakshennya vody vyrobnytstva benzolu na RCHZ «Zorya» [Study of the Regeneration Process of Spent Cationite from the Water Softening Unit in Benzene Production at RCHZ "Zarya"] *Visnyk skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dalya*. no. 7 (224). - pp. 32–36.
15. Shablii T. O., Radovenchyk V. M., Homelia M. D. (2014). Zastosuvannya novykh reahentiv u promyslovomu vodospozhyvanni [Application of New Reagents in Industrial Water Consumption]. Kyiv: Infodruk. 302 p.
16. Filipchuk V. L., Filipchuk L. V. (2017). Elektrokhimichne pom'yakshennya vody v diaframovomu elektrolizeri [Electrochemical softening of water in a diaphragm electrolyzer]. *Skhidnoyevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. no. 2/6 (86). pp. 16 - 24. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.96120>