

УДК 628.164

ДИСКРЕТНО-ІМПУЛЬСНЕ ВВЕДЕННЯ ЕНЕРГІЇ – ЕФЕКТИВНИЙ МЕТОД ВИДАЛЕННЯ ГІДРОКАРБОНАТУ КАЛЬЦІЮ ТА ЗМЕНШЕННЯ ЖОРСТКОСТІ ВОДИ**Ободович О.М.¹**, докт.тех.наук, професор, **Целень Б.Я.²**, канд. техн. наук, **Переяславцева О.О.³**, канд. техн. наук, **Степанова Л.Є.⁴**, канд. техн. наук*Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст 2а, Київ, 03680, Україна*¹завідувач відділу, e-mail: tdsittf@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>²пров.н.с, ст.н.с., e-mail: b0d@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>³пров.н.с, ст.н.с., e-mail: alena_p11@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0001-2646-8600>⁴стар.н.с, e-mail: super-olesya2807@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7179-7251><https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.4>

Наведено результати експериментальних досліджень впливу принципу дискретно-імпульсного введення енергії на процес вилучення з води гідрокарбонату кальцію для зниження її жорсткості. Розроблено роторно-пульсаційний апарат спеціальної конструкції і технологічні режими обробки води для нього. Наведено результати досліджень впливу концентрації аміаку, гідроксиду амонію і режимних параметрів обробки на рН, концентрацію іонів кальцію і жорсткість води. Визначено, що обробка води за принципом ДІВЕ в роторно-пульсаційному апараті може знайти застосування при реалізації низки хімічних методів пом'якшення води для зменшення витрати реагентів та підвищення ступеня її очищення.

The results of experimental research on the influence of the principle of discrete-pulse energy input on the process of extracting calcium bicarbonate from water to reduce its hardness are given. A rotor-pulsation apparatus of a special design and technological modes of water treatment for it have been developed. The results of studies of the influence of the concentration of ammonia, ammonium hydroxide and processing regime parameters on pH, the concentration of calcium ions and water hardness are presented. It was determined that water treatment according to the principle of DPEI in a rotary-pulsation apparatus can be used in the implementation of a number of chemical methods of water softening to reduce the consumption of reagents and increase the degree of its purification.

Бібл. 11, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: загальна жорсткість, карбонат кальцію, гідроксид амонію, водневий показник, швидкість зсуву.

Зниження жорсткості води є актуальною проблемою як для теплових станцій, муніципальних систем водопостачання, так і для промислових підприємств. Проблема жорсткості води особливо відчутна при використанні для господарсько-питного водопостачання підземних та ґрунтових вод з високим показником жорсткості, через наявність в них мінеральних домішок, зокрема гідрокарбонатів кальцію і магнію. При нагріванні такої води іони кальцію і магнію утворюють малорозчинні сполуки. Ці сполуки відкладаються на поверхнях теплообмінних апаратів, теплоенергетичних установок, трубопроводів, що призводить до зниження ефективності їх роботи, перевитрати палива, частих зупинок для очищення тощо. Дослідження в даному напрямку проводились багатьма науковцями і дозволили вирішити проблему вилучення з води солей жорсткості, проте досі актуальною є проблема пошуку оптимальних способів її реалізації, спрямованих на зниження

енергетичних витрат та інтенсифікацію перебігу процесу пом'якшення води. Зокрема, очищення котлової води здійснюється для мінімізації корозії, відкладень, накипу в контурах водяної пари [1]. Враховуючи вищевикладене, можна зробити висновок, що видалення гідрокарбонату кальцію та зменшення жорсткості води залишається нагальною потребою не лише в галузі теплоенергетики, а також для підготовки підземних вод для споживання населенням і технологічних потреб.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Для зниження жорсткості води використовують методи термічної, реагентної, мембранної, електрохімічної і магнітної обробки, іонний обмін, а також їх поєднання.

Зокрема, в роботі [2] проаналізовано класичні методи пом'якшення води (хімічний, інгібітори осадження, електрохімічна обробка, іонообмін і мембранне розділення). Основним недоліком цих методів є зміна

складу води або утворення відходів, тому ці процеси продовжують удосконалюватись за допомогою нових матеріалів і використання більш екологічних та менш забруднюючих речовин.

Як альтернатива, наводяться магнітні та електромагнітні методи, перевагою яких є неінвазивність, відносна дешевизна і відсутність потреби додавання хімічних речовин у воду [3]. Однак їх ефективність чітко не продемонстрована, так як залежить від температури, тиску, вмісту розчиненого діоксиду вуглецю, рН, інтенсивності поля, потоку води тощо. Крім цього, отриманий ефект є тимчасовим, про що згадується в роботі [4].

Розглянуто можливість заміни процесу іонного обміну на зворотний осмос з метою зниження кількості стічних вод, однак такий підхід призведе до підвищення вартості обробки, оскільки пропонується залишити енерговитратні стадії попередньої обробки – декарбонізацію та фільтрацію [5]. У дослідженні [6] при обробці живильної води для водотрубного парового котла з тиском 20 бар, для інтенсифікації процесу зниження вмісту солей жорсткості у воді застосовували ізольовані ультразвукові коливання. Однак застосування ультразвукових технологій може бути економічно оправданим лише при невисокій продуктивності обладнання.

Перелічені методи хоч і набули широкого поширення, але мають ряд недоліків, пов'язаних з великою витратою реагентів, необхідністю попередньої підготовки води, обробкою стічних вод і складністю з їх скиданням. Це призводить до пошуку нових технологічних рішень для інтенсифікації процесу зниження жорсткості води. Наразі розвиваються комбіновані технології водопідготовки, що поєднують як вже існуючі процеси так і нові технологічні розробки, зокрема [7].

Одним з енергоефективних методів впливу на рідкі гетерогенні середовища є принцип дискретно-імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Цей метод дозволяє інтенсифікувати технологічні процеси в теплоенергетиці, комунальному господарстві, харчовій, хімічній та інших галузях промисловості.

Реалізація принципу ДІВЕ передбачає створення великої кількості рівномірно розподілених у дисперсному середовищі робочих органів або робочих елементів, які трансформують стаціонарну теплову, механічну або інші види енергії в енергетично потужні імпульси, дискретні в часі та просторі. Ефекти, що їх супроводжують, зазвичай недосяжні при використанні традиційних методів при обробці дисперсних середовищ навіть при значно вищому рівні питомих енерговитрат [8].

Цей метод використовувався в технологіях підготовки питної та технологічної води а також очищення стоків [9–11], але не для видалення гідрокарбонату кальцію. Застосування принципу ДІВЕ для зниження жорсткості води повинно створити умови для інтенсифікації процесу вилучення гідрокарбонату кальцію при нижчих енергозатратах на перебіг і отриманню стійкого в часі ефекту після обробки. Це дозволить знизити вартість водопідготовки і підвищити продуктивність процесу пом'якшення води.

Мета і задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності видалення гідрокарбонату кальцію і зменшення жорсткості води за рахунок застосування принципу ДІВЕ. Це дасть можливість вдосконалити технологію очищення води для теплових станцій, муніципальних систем водопостачання і для промислових підприємств.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні задачі:

- визначити вплив швидкості зсуву потоку та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті на рН води і концентрацію іонів кальцію;

- визначити вплив концентрації аміаку та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті на величину рН водного розчину при постійній швидкості зсуву в потоці;

- визначити вплив концентрації гідроксиду амонію та швидкості зсуву в потоці рідини на концентрацію іонів кальцію у воді;

- визначити вплив концентрації гідроксиду амонію у воді та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті на загальну жорсткість води;

- визначити вплив концентрації гідроксиду амонію та швидкості зсуву в потоці рідини на загальну жорсткість води.

Об'єкт дослідження

Об'єктом досліджень була вода з артезіанської свердловини, що піддавалась обробленню на роторно-пульсаційному апараті з принципом ДІВЕ в аераційно-окислювальній установці роторного типу.

Вода, що використовувалась, мала наступні фізико-хімічні показники: рН – 7,2, концентрація іонів кальцію – 77,1 мг/дм³, загальна жорсткість 6,7 °Ж.

Для визначення хімічного складу води застосовували методу ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Вимірювання рН водних розчинів проводили рН – ме-

тром «Експерт-рН», визначення загальної жорсткості здійснювали методом трилонометричного титрування згідно ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості», концентрацію іонів кальцію визначали методом трилонометричного титрування згідно вимог ДСТУ ISO 6058-2003 «Якість води. Визначання кальцію. Титрометричний метод із застосуванням етилендіамінтетраоцтової кислоти».

Експериментальна установка

Очищення води від гідрокарбонату кальцію проводили на аераційній окислювальній установці роторного типу (рис. 1).

Установка складається з наступних блоків: реактора, роторно-пульсаційного апарата, контуру рециркуляції, теплообмінного контуру, блоку управління і контролю, вимірної апаратури, фільтраційної колони.

Реактор є резервуаром з корисним об'ємом 60 л і призначений для проведення процесу обробки рідини. Для уникнення нагрівання рідини внаслідок дисипації енергії при циркуляції води крізь роторно-пульсаційний апарат, корпус реактора обладнано теплообмінним контуром за допомогою якого підтримували задану температуру рідини. У верхню частину реактора вмонтований патрубок для приєднання рециркуляційного трубопроводу. У кришці реактора передбачені технологічні па-

трубки для введення в робочий об'єм рідини. У донній частині реактора передбачена заслінка для зміни величини об'ємної витрати.

Блок управління і контролю призначений для управління, контролю і регулювання роботи електрообладнання. Блок складається з магнітного пускача, перетворювача частоти, амперметра, лічильника електроенергії.

Фільтраційна колона є скляною трубою, що заповнюється фільтруючим матеріалом (кульками пінополістиролу, активованим вугіллям, кварцовим піском тощо) і призначена для окиснення і видалення осаду.

Дослідно-промислова установка працює наступним чином. У реактор (1) через патрубок подається вода. Потім вмикають роторно-пульсаційний апарат (2), триходовий кран (3) знаходиться в положенні, при якому рідина циркулює через трубопровід рециркуляції (4) по контуру «реактор – роторно-пульсаційний апарат – реактор». Під час рециркуляції відкривають двоходовий кран, через який за рахунок розрідження, створеного у всмоктуючому трубопроводі, надходить повітря з атмосфери. Таким чином, рідина насичується повітрям. Отримана суміш направляється в робочу камеру роторно-пульсаційного апарата де піддається обробці за принципом ДІВЕ. Після роторно-пульсаційного апарата



Рис. 1. Аераційно-окиснювальна установка роторного типу: 1 – реактор; 2 – роторно-пульсаційний апарат; 3 – триходовий кран; 4 – контур рециркуляції; 5 – фільтраційна колона; 6 – розпилювальна голівка; 7 – блок управління і контролю

суміш диспергованих в рідині бульбашок повітря (газова емульсія) надходить в трубопровід і поступає в нижню частину фільтраційної колони (5). Проходячи крізь фільтруючий шар, рідина виходить з колони і подається до збірника готової продукції. У разі недостатнього очищення рідина може рециркулювати по замкненому контуру «реактор – роторно-пульсаційний апарат – фільтраційна колона – реактор» потрібну кількість разів, після чого надходить до збірника готової продукції. При рециркуляції рідина надходить назад в реактор, проходячи через розпилювальну головку (6). Параметри процесу встановлюються через блок управління і контролю (7).

Вплив швидкості зсуву потоку та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті на рН води і концентрацію іонів кальцію

Очищення води проводили при температурі 20°C, швидкості зсуву потоку $(20-40) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ протягом 1-20 циклів обробки.

Швидкість зсуву потоку визначали за формулою:

$$\gamma = \frac{\omega \cdot R}{\delta}$$

де ω – кутова швидкість обертання ротора, c^{-1}

R – радіус від центра валу електродвигуна до внутрішньої поверхні ротора, м

δ – зазор між статором та ротором, м.

Під одним циклом обробки вважали час, за котрий весь об'єм води, що обробляється, пройде крізь роторно-пульсаційний апарат.

При проведенні досліджень контролювали у воді зміну концентрації іонів кальцію та рН. На рис.2 наведено залежність рН води від кількості циклів обробки та швидкості зсуву, що діє на потік рідини.

Найбільш суттєве підвищення рН спостерігалось при обробці води зі швидкістю зсуву в потоці $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ протягом 11-12 циклів обробки. При подальшій обробці води рН практично не змінювався.

В табл. 1 наведено зміну концентрації іонів кальцію (з початковою концентрацією 77,1 мг/л) від кількості циклів обробки і швидкості зсуву, що діє на потік рідини.

Отримані результати показують, що обробка води в роторно-пульсаційному апараті дозволяє знизити вміст іонів кальцію на 28-30 %.

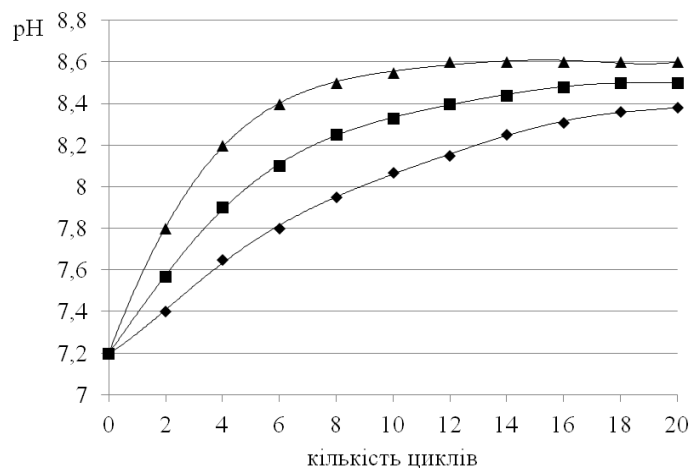


Рис. 2. Залежність зміни рН води від кількості циклів обробки і швидкості зсуву потоку: \blacklozenge – 20; \blacksquare – 30; \blacktriangle – 40 (10^3 c^{-1})

Таблиця 1. Зміна концентрації іонів кальцію (мг/л) від кількості циклів обробки і швидкості зсуву потоку

Кількість циклів обробки	Концентрація іонів кальцію, мг/л		
	$\gamma = 20 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma = 30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma = 40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$
5	74,0	72,2	67,4
10	70,1	67,2	58,5
15	66,3	62,6	57,1
20	57,9	57,3	57,0

Вплив концентрації аміаку та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті на величину рН водного розчину при постійній швидкості зсуву в потоці

Було проведено дослідження по підлужуванню вихідної води водним розчином аміаку в кількості 0,005 – 0,015 мас% з подальшою обробкою суміші в роторно-пульсаційному апараті зі швидкістю зсуву потоку $(20 - 40) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ протягом 10 – 20 циклів обробки. Отримані результати наведені на рис. 3.

Зі збільшенням концентрації аміаку у воді від 0,05 до 0,15 мас% значення рН збільшується до максимального протягом перших 10 – 12 циклів обробки для всіх значень концентрації аміаку.

Вплив концентрації гідроксиду амонію та швидкості зсуву в потоці рідини на концентрацію іонів кальцію у воді

В табл. 2 наведено експериментальні дані зміни кількості іонів кальцію (мг/л) від концентрації у воді гідроксиду амонію та швидкості зсуву, що діє на потік рідини при обробці в роторно-пульсаційному апараті.

Зі збільшенням вмісту гідроксиду амонію в розчині від 0 до 0,15 мг/л без обробки концентрація іонів кальцію знижується на 64 %. Зі збільшенням швидкості зсуву потоку $(20, 30, 40) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ концентрація іонів кальцію зменшується на 98,5; 98,7; 99,3 % відповідно.

Вплив концентрації гідроксиду амонію у воді та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті на загальну жорсткість води

На рис. 4 наведено залежність зміни загальної жорсткості води від вмісту гідроксиду амонію та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті при постійній швидкості зсуву. Вихідна жорсткість води становила 6,7 °Ж.

На рис. 4 наведено залежність зміни загальної жорсткості води від вмісту гідроксиду амонію та кількості циклів обробки в ротаційно-пульсаційному апараті при постійній швидкості зсуву. Початкова жорсткість води 13,4 ммоль/л. Наші результати свідчать, що зниження жорсткості води до значення менше 0,2 ммоль/л спостерігається при концентрації гідроксиду амонію 0,1–0,15% мас.% після 9–10 циклів обробки.

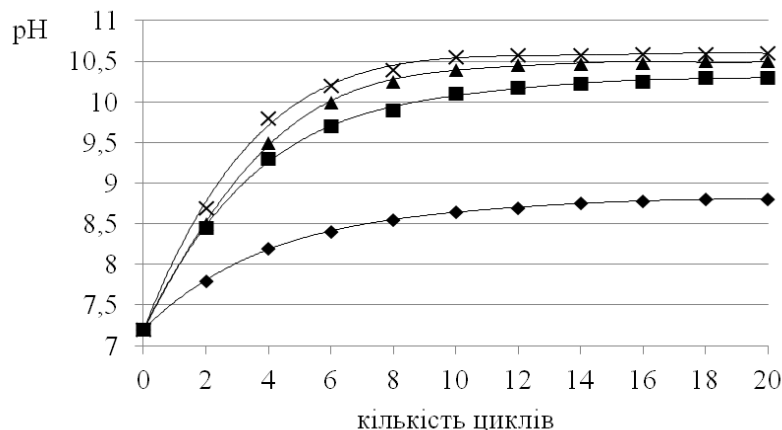


Рис. 3. Залежність зміни рН водного розчину від концентрації аміаку

◆ – 0,00; ■ – 0,05; ▲ – 0,1; × – 0,15 (мас %) та кількості циклів обробки за швидкості зсуву потоку – $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$

Таблиця 2. Залежність зміни кількості іонів кальцію (мг/л) від концентрації у воді гідроксиду амонію та швидкості зсуву, що діє на потік рідини при обробці в роторно-пульсаційному апараті

Вміст гідроксиду амонію в розчині, мас%	Концентрація іонів кальцію, мг/л			
	0	$\gamma=20 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma=30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma=40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$
0	77,1	70,1	67,2	58,4
0,05	56,5	14,6	11,9	9,08
0,1	50,3	1,17	0,94	0,72
0,15	27,6	1,14	0,92	0,70

Вміст гідроксиду амонію в кількості 0,5 мас.% дає змогу знизити жорсткість води до 0,8 ммоль/л після 10–12 циклів обробки. Без додавання гідроксиду амонію жорсткість води знижується до 7,6 ммоль/л після 10–11 циклів обробки.

Вплив концентрації гідроксиду амонію та швидкості зсуву в потоці рідини на загальну жорсткість води

В табл. 3 наведені результати вимірювання загальної жорсткості води залежно від вмісту в ній гідроксиду амонію та швидкості зсуву в потоці рідини після обробки в роторно-пульсаційному апараті.

Згідно даних таблиці 3 для досягнення показника загальної жорсткості води менше 0,2 ммоль/л спостерігається при концентрації гідроксиду амонію в розчині становить вище 0,1 мас% і швидкості зсуву в потоці рідини, вище $30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$.

Обговорення результатів дослідження впливу концентрації аміаку, гідроксиду амонію і режимних параметрів обробки на рН, концентрацію іонів кальцію і жорсткість води

Зміна рН води зумовлена тим, що при проходженні води крізь робочі органи роторно-пульсаційного апарата (рис. 1) відбувається видалення абсорбованого діоксиду вуглецю, розрив водневих зв'язків окремих молекул води та утворення водяної пари. Відомо, що карбонати, гідрокарбонати та вільний діоксид вуглецю є формами існування вугільної кислоти, їх кількісні співвідношення визначаються величиною рН розчину незалежно від концентрації гідрокарбонатів. Починаючи зі значень рН вище 8,0 відбувається утворення карбонат-іонів, що забезпечує можливість формування твердої фази карбонату кальцію. Найбільш ефективно зниження іонів кальцію відбувалось при обробці води зі швидкістю зсуву потоку $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ протягом 15 циклів обробки. Початкова концентрація становила 77,1 мг/л, а після обробки – 57,1 мг/л (табл. 1).

Максимальне підвищення рН від початкового 7,2 до кінцевого 8,6 спостерігалось при обробці води зі швидкістю зсуву в потоці рідини $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ протягом 11–12 циклів обробки. При подальшій обробці води досліджувані показники практично не змінювались, що пов'язано з максимально можливою декарбонізацією

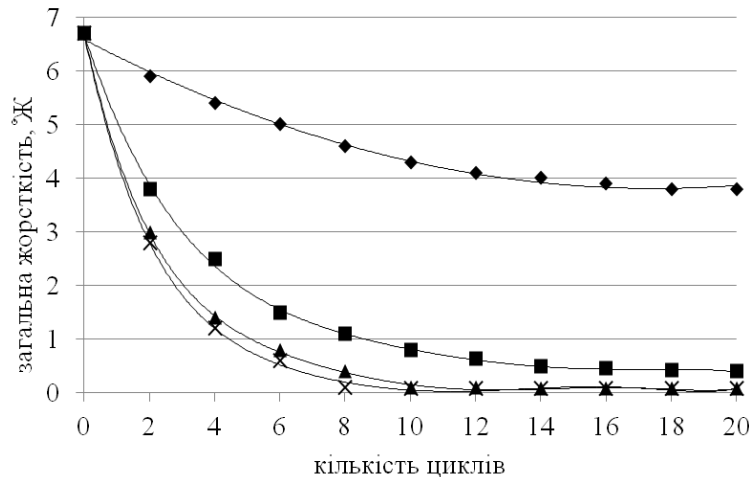


Рис. 4. Залежність зміни загальної жорсткості води від вмісту гідроксиду амонію в розчині (♦ – 0,00; ■ – 0,05; ▲ – 0,1; × – 0,15 (% мас)) та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті (швидкість зсуву потоку $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$)

Табл. 3. Залежність зменшення загальної жорсткості води (ммоль/л) від вмісту в ній гідроксиду амонію та швидкості зсуву потоку (γ) після обробки в ротаційно-пульсаційному апараті

Вміст гідроксиду амонію в розчині, мас%	Загальна жорсткість води, ммоль/л			
	0	$\gamma=20 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma=30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$\gamma=40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$
0	13,4	11,0	9,4	7,6
0,05	6,0	3,8	1,6	0,8
0,1	4,6	1,6	0,2	0,16
0,15	4,4	0,28	0,18	0,14

води при даних режимах ведення процесу. Таким чином, обробка води в роторно-пульсаційному апараті дозволяє знизити вміст іонів кальцію на 28–30%, проте цього недостатньо для використання такої води в теплоенергетиці.

В рамках даного дослідження проведено обробку попередньо піддуженої води водним розчином аміаку в кількості 0,005 – 0,015 мас% в роторно-пульсаційному апараті зі швидкістю зсуву потоку $(20–40) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ протягом 10 – 20 циклів обробки. Встановлено, що зі збільшенням концентрації аміаку у воді від 0,05 до 0,15 мас% значення рН збільшується максимум до 10,6 і це збільшення відбувається протягом перших 10–12 циклів обробки для будь-яких концентрацій. Тому при подальших дослідженнях обробку водного розчину аміаку доцільно проводити в роторно-пульсаційному апараті протягом 10 циклів.

Також проводили дослідження впливу параметрів обробки на зміну концентрації іонів кальцію у воді (таблиця 1). Зниження концентрації іонів кальцію у воді пояснюється тим, що певна кількість кальцію переходить в нерозчинну форму.

Отримані результати обробки попередньо піддуженої води водним розчином аміаку, що наведені на рис. 3 порівнюючи їх з рис. 2 показують приблизно однакову закономірність зміни рН від кількості циклів обробки при вищих значення рН води.

Зі збільшенням вмісту гідроксиду амонію в оброблюваній воді від 0 до 0,15 мг/л без обробки в роторно-пульсаційному апараті концентрація іонів кальцію знижується на 64 % (таблиця 2), проте при швидкостях зсуву в потоці $(20, 30, 40) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ концентрація іонів кальцію знижується на 98,5; 98,7; 99,3 % відповідно.

Досліджено зміну загальної жорсткості води (ммоль/л) в залежності від концентрації в розчині гідроксиду амонію і кількості циклів обробки при постійній швидкості зсуву потоку в роторно-пульсаційному апараті $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ (рис. 4). Визначено, що зниження жорсткості води до значення менше 0,2 ммоль/л спостерігається при вмісті гідроксиду амонію концентрацією 0,1–0,15 % мас. після 9 – 10 циклів обробки. Вміст гідроксиду амонію концентрацією 0,05 % мас дозволяє знизити жорсткість води до 0,8 ммоль/л після 10–12 циклів обробки. Без додавання гідроксиду амонію жорсткість води після 10–11 циклів обробки знижується до 7,6 ммоль/л.

Встановлено, що незалежно від концентрації гідроксиду амонію в розчині жорсткість води макси-

мально знижується на 10 циклі обробки, тому подальша обробка в роторно-пульсаційному апараті є недоцільною так як призводить лише до неефективних енерговитрат.

Дані таблиці 3 підтверджують результати, наведені на рис. 4, в тому, що оптимальний вміст гідроксиду амонію в розчині становить 0,1 мас.%, а швидкість зсуву в потоці рідини, що обробляється в роторно-пульсаційному апараті, становить $40 \cdot 10^3 \cdot \text{c}^{-1}$. При таких умовах обробки загальна жорсткість води знижується до показника 0,16 ммоль/л. Це відповідає загальноприйнятим вимогам до якості води для водогрійних котлів, згідно з якими жорсткість води не повинна перевищувати 0,1–0,2 ммоль/л.

Застосування роторно-пульсаційного апарата дозволяє підвищити продуктивність процесу пом'якшення води та інтенсифікувати його при відносно низьких питомих енергетичних витратах. Це пояснюється тим, що при обробці в роторно-пульсаційному апараті утворюється водоповітряна суміш. Проходячи через робочі органи роторно-пульсаційного вузла, зазнає впливу ударних хвиль, міжфазної турбулентності, мікрокавітації та вихорів, що призводить до інтенсивного дроблення бульбашок повітря, дисперсних частинок та збільшення площі поверхні контакту фаз.

Завдяки цьому збільшується швидкість масоперенесення кисню з газової фази в рідину і його транспортування рідиною. Одночасно відбувається і зміна структури води з утворенням вільних водневих зв'язків, що зумовлює її підвищену активність та реагентну здатність. Це дає можливість збільшити швидкість хімічних реакцій і технологічних процесів.

Обмеження цього дослідження полягають у тому, що при застосуванні отриманих результатів на практиці чи подальших теоретичних дослідженнях слід враховувати, що перебіг процесу пом'якшення води визначається конструктивними особливостями роторно-пульсаційного апарату та вихідними фізико-хімічними параметрами води.

Недоліком дослідження є те, що отримані результати є адекватними при наведених технологічних параметрах процесу. При потребі використання іншої конструкції роторно-пульсаційного апарата чи зміни продуктивності установки, потрібно провести додаткове дослідження при цих умовах, оскільки данай процес в роторно-пульсаційному апараті перебігає під впливом багатьох факторів і складно піддається теоретичним розрахункам.

Розвиток даного дослідження полягає в тому, що обробка води за принципом ДІВЕ в роторно-пульсаційному апараті може знайти застосування при реалізації низки хімічних методів пом'якшення води для зменшення витрати реагентів та підвищення ступеня її очищення. При цьому можуть виникнути труднощі з розрахунками, пов'язаними з вибором роторно-пульсаційного апарата, оскільки ще не існує єдиної методики розрахунку таких апаратів, бо потрібно враховувати окремі умови перебігу процесу

Висновки

1. Встановлено, що збільшення швидкості зсуву потоку рідини при його проходженні через роторно-пульсаційний апарат та збільшення кількості циклів обробки призводить до підвищення рН води від 7,2 до 8,6 при швидкості зсуву $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ після 10 – 12 циклів обробки. Подібна закономірність також спостерігалась при визначенні концентрації іонів кальцію, що знизилась з 77,1 до 57,1 мг/л протягом 15 циклів обробки при тій же швидкості зсуву потоку. Ці зміни зумовлені розривом водневих зв'язків у воді внаслідок її механоактивації, вилученням абсорбованого діоксиду вуглецю та утворенням нерозчинного карбонату кальцію. Зниження вмісту іонів кальцію на 28 – 30 %, проте, недостатньо для використання такої води в теплоенергетиці.

2. Визначено, що при збільшенні концентрації аміаку та кількості циклів обробки в роторно-пульсаційному апараті при постійній швидкості зсуву в потоці $40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ спостерігається зростання рН води вище 10 при концентрації аміаку від 0,05 до 0,15 % мас після 10 циклів обробки в той час як без додавання аміаку рН води зростає до 8,6.

3. Зі збільшенням концентрації гідроксиду амонію в розчині від 0 до 0,15 мг/л без обробки концентрація іонів кальцію знижується на 64 %, проте при швидкостях зсуву в потоці $(20, 30, 40) \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ концентрація іонів кальцію знижується на 98,5; 98,7; 99,3 % відповідно.

4. Встановлено, що зниження жорсткості води до значення менше 0,2 ммоль/л відбувається при концентрації гідроксиду амонію 0,1–0,15 % мас. після 9 – 10 циклів обробки. Це відповідає вимогам якості води для водогрійних котлів, а без додавання гідроксиду амонію жорсткість води знижується максимум до 7,6 ммоль/л

5. Визначено, що для забезпечення показника жорсткості води 0,16 ммоль/л оптимальний вміст гідроксиду амонію в розчині повинен становити 0,1 мас% при швидкості зсуву в потоці рідини

$40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$. Це узгоджується з загальноприйнятими вимогами щодо якості води для водогрійних котлів, згідно яких жорсткість води не повинна перевищувати 0,1–0,2 ммоль/л.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Vakkilainen, E. K.* (2017). Availability and Reliability. Steam Generation from Biomass, 180–202. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804389-9.00008-3>
2. *Moya, S., Boluda-Botella, N.* (2021). Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale. Prospecting in Water Treatment by Magnetism and Electromagnetism, Water, 13, 2365. <https://doi.org/10.3390/w13172365>
3. *Chibowski, E., & Szcześ, A.* (2018). Magnetic water treatment—A review of the latest approaches, Chemosphere, 203, 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.160>
4. *Mghaiouini, R., Benzbiria, N., Belghiti, M. E., Belghiti, H. E., Monkade, M., El bouari, A.* (2020). Optical properties of water under the action of the electromagnetic field in the infrared spectrum. Materials Today: Proceedings, 30, 1046–1051. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.518>
5. *Kukić, D. V., Šćiban, M. B., Mitrović, B. B., Prodanović, J. M., Vasić, V. M., Ivetić, D. Ž., Antov, M. G.* (2012). Possibility of improvement of boiler water treatment process—ion exchange vs. reverse osmosis. Desalination and Water Treatment, 51 (1-3), 518–524. doi: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714860>
6. *Brandão, Y. F. F., dos Santos, L. B., de Araújo, G. P., Pedrosa Júnior, L. P., da Costa Neto, B. F., da Silva, R. de C.F.S.* et al. (2022). Use of High-Frequency Ultrasound Waves for Boiler Water Demineralization/Desalination Treatment. Energies, 15 (12), 4431. doi: <https://doi.org/10.3390/en15124431>
7. *Taqvi, S. A., Sohail, M., Uddin, F.* (2016). Utilization of Ion-Exchange Technology for Boiler Feed Water Production-Design and Testing. Chemical Engineering, 1, 26–35. Available at: https://www.researchgate.net/publication/309536721_Utilization_of_Ion-Exchange_Technology_for_Boiler_Feed_Water_Production-Design_and_Testing
8. *Avdieieva, L. I.* (2016). Implementation of the Principle of Discrete-Pulse Energy Input to the Creation of Nanotechnologies for Food Industry. Science and Innovation, 12 (4), 11–15. doi: <https://doi.org/10.15407/scine12.04.011>
9. *Dolinskyi, A.A., Obodovych, O.M., Sydorenko, V.V.* (2018). Influence of Discrete Pulse Energy Input at Absorption of Oxygen in the Liquid Medium. Journal of Water Chemistry and Technology, 40 (6), 354–358. doi: <https://doi.org/10.3103/s1063455x18060073>

10. Dolinskiy, A.A., Obodovich, A.N., Sydorenko, V.V. (2018). Intensification of aeration and mass transfer in wastewater treatment by discrete-pulse energy input. *Thermophysics and Aeromechanics*, 25 (4), 623–630. doi: <https://doi.org/10.1134/s0869864318040145>

11. Obodovych, O., Tselen, B., Sydorenko, V., Ivanytskyi, G., Radchenko, N. (2022). Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*, 53, 123–130. doi: <https://doi.org/10.2298/apt2253123o>

DISCRETE PULSE INPUT OF ENERGY IS AN EFFECTIVE METHOD OF REMOVING CALCIUM HYDROCARBONATE AND REDUCING WATER HARDNESS

Obodovych O.M.¹, Tselen B.Y.², Pereiaslavl'tseva O.O.³, Stepanova O.E.⁴

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine

¹Dr. Sci. (Engin.), Professor, orcid.org/0000-0001-7213-3118, e-mail: tdsittf@ukr.net

²PhD (Engin.), [orcid.org/https://orcid.org/0000-0001-5213-0219](https://orcid.org/0000-0001-5213-0219), e-mail: b0d@ukr.net

³PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: alena_p11@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0001-2646-8600>

⁴PhD (Engin.), orcid.org/0000-0002-7179-7251, e-mail: super-olesya2807@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2024.4>

For municipal water supply systems, industrial enterprises, and thermal plants, the content of mineral impurities in water is regulated, which necessitates the use of technologies for their removal.

The object of study was water from an artesian well, which was treated on a rotor-pulsation apparatus that implements the principle of discrete-pulse energy input in an aeration-oxidizing setup of rotor type.

The effect of the principle of discrete-pulse energy input on the process of extracting calcium bicarbonate from water to reduce its hardness is studied.

It was determined that when treating water in the rotor-pulsation apparatus without adding ammonium hydroxide solution, it is possible to reduce the calcium ions concentration from 77,1 to 57,1 mg/L, and the total hardness from 13,4 to 7,6 mmol/L. It has been proven that the addition of 0,1 wt.% ammonium hydroxide to the treated water and treatment in the rotor-pulsation apparatus at the flow shear rate of $40 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ during 10 cycles allows for to reduce in the calcium ions concentration by 99,3 % and to reduce the total hardness to 0,16 mmol/L.

This is explained by the formation of a water-air mixture, which, passing through the rotor-pulsation apparatus, is affected by shock waves, interphase turbulence, microcavitation, and vortices, which leads to an increase in

the rate of mass transfer of oxygen from the gas phase to the liquid and its transportation by the liquid. At the same time, the structure of water changes with the formation of free hydrogen bonds, which causes its increased activity and reactive capacity.

Water treatment according to the principle discrete-pulse energy input in the rotor-pulsation apparatus is recommended for use in the implementation of a number of chemical softening methods to reduce the consumption of reagents and increase the degree of purification.

References 11, figures 4, tables 3.

Key words: total hardness, calcium carbonate, ammonium hydroxide, hydrogen index, shear rate.

1. Vakkilainen, E. K. (2017). Availability and Reliability. Steam Generation from Biomass, 180–202. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804389-9.00008-3>

2. Moya, S., Boluda-Botella, N. (2021). Review of Techniques to Reduce and Prevent Carbonate Scale. Prospecting in Water Treatment by Magnetism and Electromagnetism, Water, 13, 2365. <https://doi.org/10.3390/w13172365>

3. Chibowski, E., & Szcześ, A. (2018). Magnetic water treatment—A review of the latest approaches, Chemosphere, 203, 54–67. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.160>

4. Mghaiouini, R., Benzbiria, N., Belghiti, M. E., Belghiti, H. E., Monkade, M., El bouari, A. (2020). Optical properties of water under the action of the electromagnetic field in the infrared spectrum. Materials Today: Proceedings, 30, 1046–1051. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.518>

5. Kukić, D. V., Šćiban, M. B., Mitrović, B. B., Prodanović, J. M., Vasić, V. M., Ivetić, D. Ž., Antov, M. G. (2012). Possibility of improvement of boiler water treatment process—ion exchange vs. reverse osmosis. Desalination and Water Treatment, 51 (1-3), 518–524. doi: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714860>

6. Brandão, Y. F. F., dos Santos, L. B., de Araújo, G. P., Pedrosa Júnior, L. P., da Costa Neto, B. F., da Silva, R. de C. F. S. et al. (2022). Use of High-Frequency Ultrasound Waves for Boiler Water Demineralization/Desalination Treatment. Energies, 15 (12), 4431. doi: <https://doi.org/10.3390/en15124431>

7. Taqvi, S. A., Sohail, M., Uddin, F. (2016). Utilization of Ion-Exchange Technology for Boiler Feed Water Production-Design and Testing. Chemical Engineering, 1, 26–35. Available at: https://www.researchgate.net/publication/309536721_Utilization_of_Ion-Exchange_Technology_for_Boiler_Feed_Water_Production-Design_and_Testing

8. *Avdieieva, L. I.* (2016). Implementation of the Principle of Discrete-Pulse Energy Input to the Creation of Nanotechnologies for Food Industry. *Science and Innovation*, 12 (4), 11–15. doi: <https://doi.org/10.15407/scine12.04.011>

9. *Dolinskyi, A.A., Obodovych, O.M., Sydorenko, V.V.* (2018). Influence of Discrete Pulse Energy Input at Absorption of Oxygen in the Liquid Medium. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 40 (6), 354–358. doi: <https://doi.org/10.3103/s1063455x18060073>

10. *Dolinskyi, A.A., Obodovich, A.N., Sydorenko, V.V.* (2018). Intensification of aeration and mass transfer in wastewater treatment by discrete-pulse energy input. *Thermophysics and Aeromechanics*, 25 (4), 623–630. doi: <https://doi.org/10.1134/s0869864318040145>

11. *Obodovych, O., Tselen, B., Sydorenko, V., Ivanytskyi, G., Radchenko, N.* (2022). Application of the method of discrete-pulse energy input for water degassing in municipal and industrial boilers. *Acta Periodica Technologica*, 53, 123–130. doi: <https://doi.org/10.2298/apt2253123o>

Отримано 11.03.2024

Received 11.03.2024

Прийнято до друку 10.08.2024
Accepted for publication 10.08.2024