

УДК 628.164-926.41

ГОРДІЄНКО К. Ю.<sup>1\*</sup>, РАДОВЕНЧИК Я. В.<sup>1</sup>, РАДОВЕНЧИК В. М.<sup>1</sup>, БАКУНОВСЬКИЙ О. О.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
<sup>2</sup> Товариство з обмеженою відповідальністю «ІВІК Формула Води»

## ТЕХНОЛОГІЇ ПОМ'ЯКШЕННЯ ВОДИ ДЛЯ СИСТЕМ МАЛОЇ І СЕРЕДНЬОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ

*Нинішній стан водних ресурсів значною мірою зумовлений діяльністю людини. Скидання забруднених вод у поверхневі водні об'єкти значно знижує їхню якість і ускладнює пряме використання. Одним з головних джерел зростання мінералізації та жорсткості поверхневих вод є скидання відпрацьованих регенераційних розчинів після іонообмінного пом'якшення, що створює замкнутий кругообіг хлоридів натрію, кальцію і магнію. Потреба в зменшенні інтенсивності цього кругообігу та скороченні забруднення навколишнього середовища виникла вже давно. Вивчення стандартної содово-натрієвої методики пом'якшення показало її низьку придатність для систем із невеликою та середньою продуктивністю через потребу у підігріві води та подальшому коригуванні рівня рН. Більш ефективним виявилось застосування фосфат-аніонів як осаджувачів, що успішно видаляють іони кальцію та магнію в широкому діапазоні температур і рівнів рН. Дослідження виявили, що утворена тверда фаза в процесі такої обробки погано відділяється від рідкої. Як один із варіантів розв'язання цієї проблеми пропонується застосування аніонних флокулянтів, які забезпечують ефективне відокремлення утворених твердих часток від води. Запропонована технологічна схема, котра розрахована на впровадження в якості етапу попередньої обробки води в системах зворотнього осмосу малої та середньої продуктивності.*

**Ключові слова:** жорсткість, фільтрування, побутові системи пом'якшення, флокулянти, обробка води фосфатами, іони магнію та кальцію

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2024.319016

\*Corresponding author: dey85@ukr.net

Received 16 September 2024; Accepted 10 October 2024

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день майже неможливо безпосередньо споживати воду з більшості поверхневих водойм України, оскільки її якість не відповідає нормативним документам [1–3]. Головними показниками, що не відповідають чинним вимогам, є підвищена мінералізація та жорсткість води. Перевищення цих параметрів заважає не лише споживанню води у господарсько-питних потребах, але й використанню її промисловими підприємствами. Особливо страждають від цієї проблеми східні та південні регіони України, де відбувається скидання шахтних вод з високою мінералізацією та жорсткістю у поверхневі водойми. У цих регіонах спостерігається стійка тенденція до зростання мінералізації та жорсткості води. Ці проблеми торкнулися також і підземних вод, які в окремих районах України характеризуються підвищеними рівнями мінералізації та жорсткості. Практика показує, що надмірне споживання води з підвищеним вмістом іонів кальцію та магнію може негативно впливати на опорно-рухову та серцево-судинну системи людини, а їхні сполуки можуть відкладатися у вигляді каменів у нирках і жовчному міхурі. Значне зменшення запасів якісної природної води підкреслює актуальність проблеми пом'якшення води, надаючи їй все більшої важливості та гостроти.

**Аналіз попередніх досліджень.** Концентрація іонів кальцію та магнію у воді визначає показник, відомий як жорсткість. Нормативні документи України обмежують жорсткість води для споживання людиною до 7 мг-екв/дм<sup>3</sup> [4]. У харчовій промисловості норматив жорсткості в межах 0,1–0,2 мг-екв/дм<sup>3</sup>, а в енергетичному секторі допустимою є жорсткість 0,03–0,05 мг-екв/дм<sup>3</sup> [5, 6]. Однією з найстаріших технологій зниження жорсткості води є содово-вапняний метод. Він полягає у двоетапній обробці жорсткої води: спочатку карбонатом натрію для осадження кальцію, а потім вапном для осадження магнію [7, 8]. Після

відділення осаду відстоюванням або фільтрацією, в обробленій воді коригують рівень рН до нейтрального. В результаті цих процесів залишкова жорсткість води становить 0,5–1,0 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Щоб реакція відбувалася ефективно, необхідно підтримувати температуру води в межах 35–40 °С. Сьогодні цей метод широко використовується в промисловості, хоча багато аспектів процесу пом'якшення залишаються мало дослідженими.

Сьогодні найефективнішим вважається варіант додаткового очищення води безпосередньо в місцях її споживання. Тому системи для пом'якшення води все частіше встановлюються та використовуються в приватних будинках, квартирах і офісах. Найбільш зручними виявилися установки, що працюють на основі іонного обміну [9–11]. Вони здатні довгий час функціонувати в автоматичному режимі без потреби в складному обслуговуванні. Однак серед недоліків їх експлуатації є утворення регенераційних розчинів з високими концентраціями хлориду натрію та значно меншими концентраціями іонів кальцію і магнію, а також використання 20–30 % обробленої води на власні потреби — промивання та регенерацію іонітів [12–14]. У результаті використання таких систем у поверхневі водойми не лише повертаються вилучені з природних вод іони кальцію та магнію, але й додається значно більша кількість хлориду натрію [15]. Можна припустити, що існування такого замкнутого циклу змусить у найближчому майбутньому не лише пом'якшувати природну воду, але й проводити її знесолення. Тому дослідження можливості розриву цього кругообігу є нині надзвичайно важливим.

**Мета статті.** При застосуванні технологій пом'якшення води в промисловості відходи або утилізуються, або накопичуються в спеціально відведених місцях. Для систем малої та середньої продуктивності такі процедури надто дорогі і наразі не передбачені. Одним із способів вирішення проблеми може бути заміна іонного обміну на простіший реагентний метод. Адже згідно з чинними нормативними документами [4], питна вода повинна містити 25–75 мг/дм<sup>3</sup> іонів кальцію та 10–50 мг/дм<sup>3</sup> іонів магнію. Тому варто вивчити ефективність реагентного методу при використанні в побутових та офісних умовах з різними осаджувачами. У промисловості цей метод реалізується переважно при підвищених температурах води, з тривалим відстоюванням для формування твердої фази, і характеризується досить низькою ефективністю. У науковій літературі практично відсутні дані щодо ефективності реагентних технологій в умовах реальних температур гідросфери та відразу після обробки реагентами. Тому метою наших експериментів було дослідити особливості реагентного пом'якшення за різних умов з точки зору можливості його використання в побутових та офісних системах.

**Методика роботи.** Об'єктом нашого дослідження були розчини із загальною жорсткістю від 5 до 35 мг-екв/дм<sup>3</sup> (з різними співвідношеннями іонів кальцію та магнію з природних водних об'єктів (з поверхневих і підземних джерел), а також води з централізованих систем водопостачання.

У ході досліджень модельний розчин об'ємом 0,1 дм<sup>3</sup> обробляли відповідною кількістю осаджувального реагенту для перетворення іонів Ca<sup>2+</sup> і Mg<sup>2+</sup> у нерозчинні сполуки та видалення їх з очищеної води. За потреби коригували температуру і рівень рН вихідного розчину. Після додавання реагентів суспензію відстоювали в мірних циліндрах і записували графіки зміни видимого об'єму осаду з часом. Для оцінки фільтраційних властивостей отриманого осаду використовували стандартну лійку діаметром 60 мм з фільтром діаметром 110 мм з паперу «синя стрічка», встановлену над мірним циліндром об'ємом 0,1 дм<sup>3</sup>. Швидкість фільтрації визначали, підтримуючи в лійці максимальний рівень суспензії при фільтруванні суспензії об'ємом 0,1 дм<sup>3</sup>. Жорсткість початкових та оброблених розчинів визначали титриметричним методом із застосуванням барвника еріохром чорний (хромоген чорний Т) та розчину трилону Б [16].

#### **Виклад основного матеріалу**

Здійснені дослідження показали, що для ефективного осадження іонів кальцію з розведених водних розчинів за допомогою карбонату натрію необхідно використати значно більшу кількість осаджувача, ніж передбачає стехіометрія [1]. Наприклад, при співвідношенні компонентів  $K = [\text{CO}_3^{2-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$  і низькій температурі води метод демонструє вкрай низьку ефективність. Вимірювання температури води з київської водопровідної системи показали, що вона варіюється в межах 13–17 °С, а в зимовий час може знижуватися до 8,5 °С. Тому для наших експериментів було обрано саме цей температурний діапазон. Встановлено, що при додаванні еквівалентної кількості осаджувача жорсткість води зменшується лише на 4 %, а після години відстоювання цей показник досягає 17 %. При цьому утворення твердої фази візуально не спостерігається, хоча з часом відбувається зниження жорсткості при фільтрації через фільтрувальний папір «синя стрічка». Збільшення дози осаджувача призводить до певного покращення результатів, проте витрати

реагентів не відповідають отриманому ефекту. Наприклад, п'ятикратне збільшення кількості карбонату натрію дозволяє лише вдвічі знизити загальну жорсткість води, а десятикратне перевищення стехіометричного співвідношення забезпечує залишкову жорсткість на рівні 0,5–0,6 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Подальше збільшення кількості осаджувача практично не впливає на залишкову жорсткість обробленої води.

При значеннях коефіцієнта  $K = [\text{CO}_3^{2-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}] > 2$ , додавання карбонату натрію починає супроводжуватися помутнінням розчину та утворенням твердої фази, яку можна зафіксувати візуально. Спочатку це ледь помітне помутніння при  $K = 3$ , далі — утворення добре видимих твердих частинок при  $K = 5$  та інтенсивне осадоутворення при  $K = 8–10$  після додавання осаджувача. Поява осаду дозволяє вивчити процес освітлення обробленої води, що зазвичай використовується для відділення твердої фази. Варто зазначити, що за низьких температур процес освітлення проходить досить нестабільно. Чіткої залежності між інтенсивністю відстоювання і співвідношенням компонентів не спостерігається. Зважаючи на те, що умови осадження в усіх випадках аналогічні, можна припустити утворення сполук карбонату кальцію з різною структурою та складом.

Результати подальших досліджень показали, що температура води суттєво впливає на процес осадження іонів кальцію (рис. 1). Оскільки нагрівання води вище 70 °С вимагає значних енерговитрат, температура в наших експериментах обмежувалася діапазоном від 10 до 70 °С. Було встановлено, що пом'якшення води відбувається більш ефективно при вищій початковій жорсткості. Як видно з рис. 1, збільшення початкової жорсткості понад 8 мг-екв/дм<sup>3</sup> дозволяє отримати після обробки відповідною кількістю карбонату натрію вміст кальцієвих іонів на рівні 0,6–1,0 мг-екв/дм<sup>3</sup>. При цьому варто зауважити, що формування твердої фази також відбувається дещо по-іншому [17].

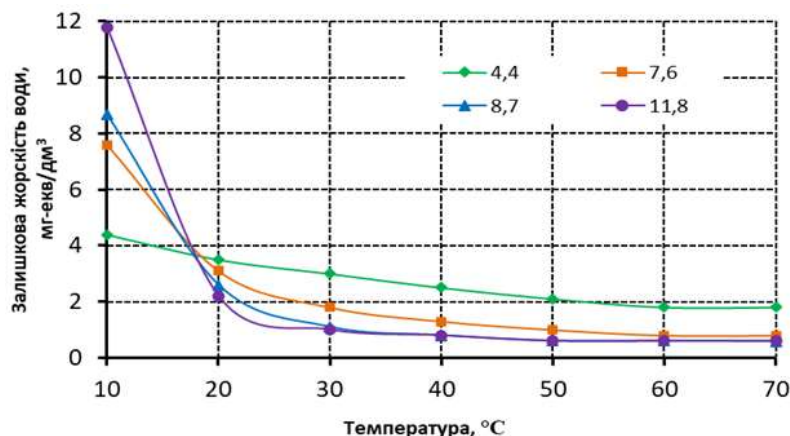


Рис. 1 – Залежність залишкової жорсткості води від температури при різних початкових значеннях жорсткості (рН = 6,85, коефіцієнт  $K = [\text{CO}_3^{2-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}] = 10$ )

Наприклад, при початковій жорсткості 4,4 мг-екв/дм<sup>3</sup> і низьких температурах формування осаду майже не спостерігається, а окремі пластівці з'являються лише при температурах вище 40 °С. При початковій жорсткості 7,6 мг-екв/дм<sup>3</sup> фіксується вже помутніння розчину при нагріванні до 40 °С навіть без осаджувача, при додаванні карбонату натрію спостерігається інтенсивне утворення твердих частинок. При збільшенні початкової жорсткості води, додавання карбонату натрію призводить до інтенсивного утворення твердої фази та її осадження на дно посудини вже при 20 °С.

Згідно з результатами подальших досліджень, навіть при температурі води 13 °С іони кальцію можуть активно осаджуватися за певних умов. Важливим фактором у цьому процесі є співвідношення концентрацій карбонат-іонів до іонів кальцію, визначене як  $K = [\text{CO}_3^{2-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$ . Це особливо помітно при значеннях коефіцієнта  $K$  у межах від 0 до 15.

Дослідження щодо видалення магнієвих іонів показали, що, на відміну від кальцію, ефективне осадження магнію можливе у формі інших нерозчинних сполук [18]. Відповідно до [19], найбільш розповсюдженими малорозчинними сполуками у воді є фосфати магнію. Цих сполук існує багато, з різним ступенем розчинності. Проте найбільш простим і поширеним є продукт гідролізу магнієвих іонів — гідроксид магнію.

Саме у формі гідроксиду магній видаляється в содово-вапняному методі, оскільки карбонат магнію має занадто високу розчинність. Крім того, при стартовій концентрації магнію 0,01 м, рН початку осадження  $Mg(OH)_2$  дорівнює 10,4, а повне осадження відбувається при рН = 12,4 [19]. Наші дослідження виявили, що видалення магнію у формі гідроксиду має суттєві недоліки, адже підвищення рН до таких значень вимагає подальшого його коригування після видалення осаду, що призводить до значних витрат реагентів. Навіть при стартовій жорсткості 19,6 мг-екв/дм<sup>3</sup>, до рН=10,5 утворення осаду в модельному розчині візуально не помітно (рис. 2). Щоб досягти помітного ефекту пом'якшення, потрібно підтримувати рН на рівні 11–11,5. З іншого боку, позитивним є те, що з плином часу оброблений розчин освітлюється, що дає можливість розділити тверду та рідку фази. Однак для використання в побуті цей метод абсолютно непридатний, оскільки вимагає додаткового коригування рН очищеної води та пов'язаний з великими витратами реагентів.

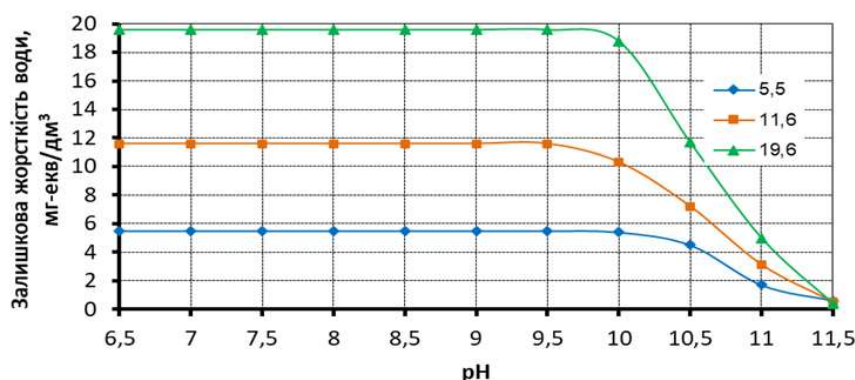


Рис. 2 – Залежність залишкової жорсткості води від рН при різних значеннях початкової жорсткості та температурі розчину 22 °С

Тому наступні дослідження були спрямовані на вивчення ефективності видалення іонів кальцію та магнію шляхом обробки води фосфатом натрію [18]. Методика досліджень залишалася незмінною. Результати експериментів показали, що ефективне осадження кальцієвих іонів фосфатом можливе навіть при дозах, менших за стехіометричні, що відрізняє цей метод від використання карбонату кальцію. Наприклад, при співвідношенні компонентів  $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [Ca^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$  та за звичайних температур метод демонструє високу ефективність (рис. 3).

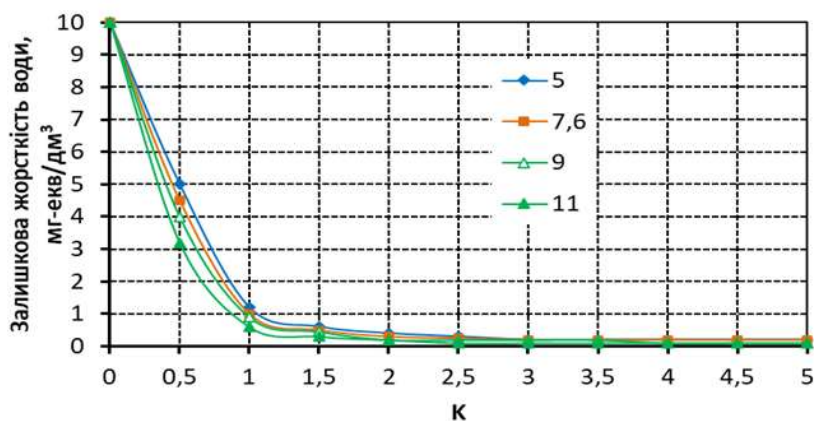
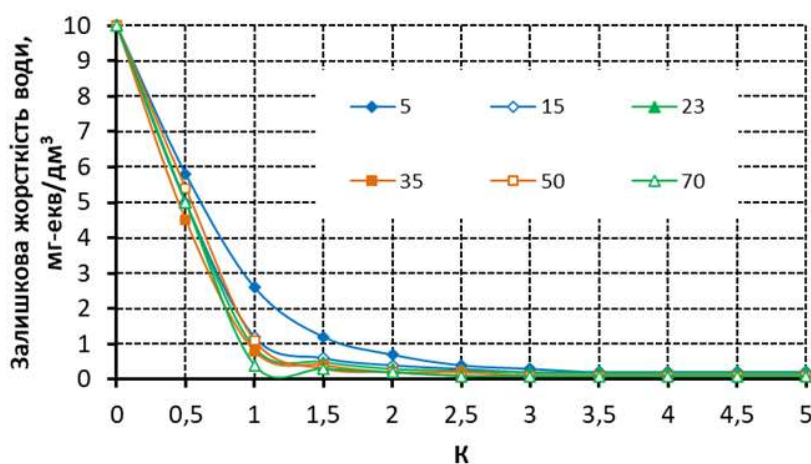


Рис. 3 – Залежність залишкової жорсткості води від співвідношення компонентів  $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [Ca^{2+}, \text{мг-екв}]$  при температурі 20 °С, початковій жорсткості  $J_{\text{поч}} = 10$  мг-екв/дм<sup>3</sup> та різних початкових значеннях водного показника

Вже при значенні  $K = 0,5$  відбувається зниження концентрації іонів кальцію більш ніж удвічі. При стехіометричному співвідношенні ( $K = 1$ ) залишковий вміст кальцію в обробленій воді стає меншим за  $1 \text{ мг-екв/дм}^3$ . Такий рівень іонів кальцію у воді, яку споживає людина, є необхідним для забезпечення її фізіологічної повноцінності з точки зору мінерального складу. Додатковою перевагою є те, що висока ефективність методу зберігається в широкому діапазоні рН від 5 до 11. При  $K > 1,5$  вміст кальцію в обробленій воді стабілізується на рівні  $0,2\text{--}0,1 \text{ мг-екв/дм}^3$ . Таким чином, на відміну від содово-вапняного методу, який вимагає значної перевитрати реагентів, використання фосфатів у процесі пом'якшення дозволяє обійтися стехіометричними співвідношеннями реагентів. Найважливішою перевагою осадження кальцію фосфатами є миттєве утворення твердої фази після змішування компонентів, що відповідає меті даної роботи. Після додавання реагенту до модельних розчинів одразу спостерігається помутніння, інтенсивно формуються тверді частинки, які через 3–5 секунд починають з'єднуватися в агрегати та осідати на дно посудини.

Температура води, яка піддається обробці, є надзвичайно важливим фактором у процесі пом'якшення. Коли в ролі осаджувача застосовують карбонат натрію, ефективність процесу при температурах нижче  $35\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$  значно знижується, що робить необхідним підігрів води. Водночас, у певні періоди вода в централізованих системах та підземних джерелах може мати температуру  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  або навіть нижчу. Тому дослідження ефективності пом'якшення води при низьких температурах є актуальним, адже це допомагає вирішити, чи потрібно попередньо підігрівати воду.

Наші експерименти з використанням фосфату натрію як осаджувача показали, що достатня ефективність досягається в широкому температурному діапазоні (рис. 4). Суттєве зниження ефективності спостерігається лише при температурі  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Однак навіть у цьому випадку зниження становить лише  $0,1\text{--}1,5 \text{ мг-екв/дм}^3$ , що є цілком прийнятним для побутових та офісних систем пом'якшення, оскільки забезпечує отримання м'якої та дуже м'якої води. Таким чином, той факт, що процес пом'якшення залишається стабільним у широкому діапазоні температур, підтверджує доцільність використання фосфатів у методах пом'якшення води.



**Рис. 4 – Залежність залишкової жорсткості води від температури і співвідношення компонентів  $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$  при початковій жорсткості  $10 \text{ мг-екв/дм}^3$  та  $\text{pH} = 7,45$**

Зниження вмісту іонів магнію у воді за допомогою фосфатів виявилось менш ефективним, ніж при видаленні іонів кальцію (рис. 5) [18]. Навіть при значенні  $\text{pH} = 10,07$  та коефіцієнті  $K = 2$ , найменша залишкова жорсткість не знижувалася нижче  $0,75 \text{ мг-екв/дм}^3$  (у випадку з кальцієм цей показник становив  $0,1\text{--}0,2 \text{ мг-екв/дм}^3$ ). Зменшення рН призводить до стійкого, хоча й не надто значного, зниження ефективності. Наприклад, при переході з лужного до кислого середовища, залишкові концентрації магнієвих іонів подвоюються незалежно від значення коефіцієнта  $K$ . Беручи до уваги сучасні суворі нормативи щодо

концентрації фосфатів у стічних водах, слід дотримуватися стехіометричних співвідношень реагентів для максимально повного протікання реакції між компонентами. Як показує рис. 5, у нейтральному середовищі при  $K = 1$  залишкова жорсткість очищеної води може досягати 3 мг-екв/дм<sup>3</sup> і більше. У інших випадках (наприклад, при певних температурах або високій початковій магнієвій жорсткості) залишкова жорсткість може бути ще вищою, що значно зменшить загальну ефективність процесу пом'якшення.

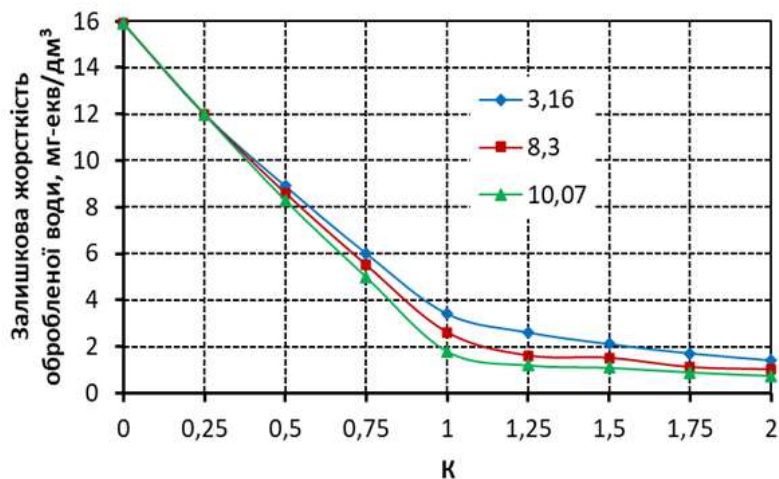


Рис. 5 – Залежність залишкової жорсткості води від коефіцієнту  $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$  при різних значеннях рН та температурі розчину 22 °С

Важливою перевагою використання фосфату натрію як осаджувача іонів магнію є те, що ефективність процесу практично не залежить від температури води у широкому інтервалі. Як показано на рис. 6, при температурах від 5 до 70 °С ефективність пом'якшення залишається стабільною. При цьому тверда фаза утворюється відразу після змішування розчинів.

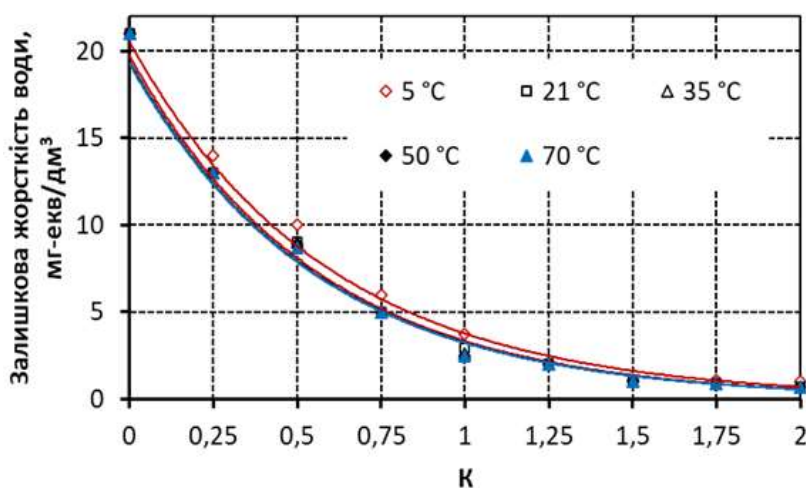


Рис. 6 – Залежність залишкової жорсткості води від коефіцієнту  $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}] / [\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$  при різних значеннях температури розчину, початковій жорсткості 21 мг-екв/дм, рН 6,58

Сумарна ефективність хімічних методів пом'якшення води може бути досягнута лише за умови повного розділення твердої та рідкої фаз. Це можна реалізувати двома способами—фільтрацією і відстоюванням.

Фільтрація є більш прийнятним методом для систем малої продуктивності—побутових, офісних тощо, де не завжди можливо встановити ємності великого об'єму. Відстоювання більш підходить для промислових високопродуктивних систем з відстійниками потрібного об'єму і може вказувати на рівень формування твердих частинок.

Беручи до уваги дисперсність твердої фази, що утворюється при обробці фосфатами, видалення твердих частинок з водних розчинів шляхом фільтрації відбувається досить повільно, що значно обмежує продуктивність технології пом'якшення. Тому ми дослідили можливість використання флокулянтів як додаткових реагентів. Як допоміжні реагенти використовували поліакриламід (ПАА) як неіоногенний флокулянт, Magnofloc–336 компанії Ciba — аніонний флокулянт з молекулярною масою до 20 млн а.о.м., та Zetag–7692 компанії Ciba — катіонний флокулянт з молекулярною масою до 20 млн а.о.м.

У результаті досліджень з'ясувалося, що оптимальні результати дає аніонний флокулянт Magnofloc–336 від компанії Ciba у дозуваннях 1–10 мг/дм<sup>3</sup> при вихідній жорсткості води 27 мг-екв/дм<sup>3</sup> і рівних концентраціях іонів кальцію та магнію (рис. 7). При відповідно обраних параметрах швидкість фільтрації суспензії майже дорівнює швидкості фільтрації дистильованої води. Жоден інший флокулянт не показав аналогічного ефекту за будь-яких дозувань і початкових значень жорсткості води [20, 21].

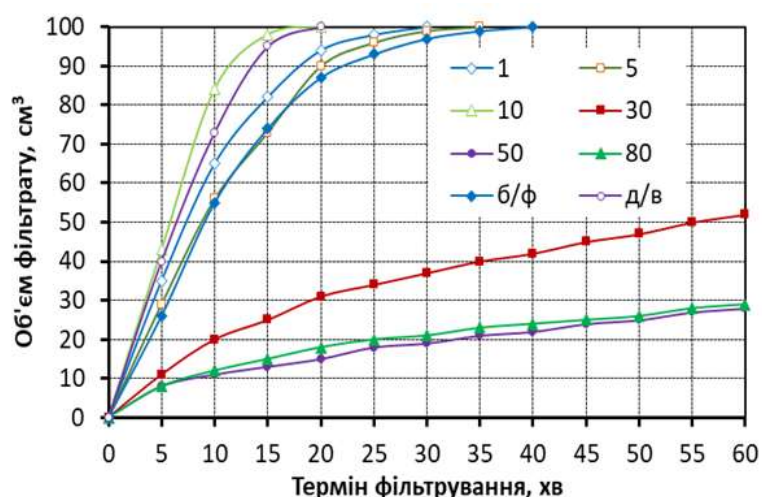
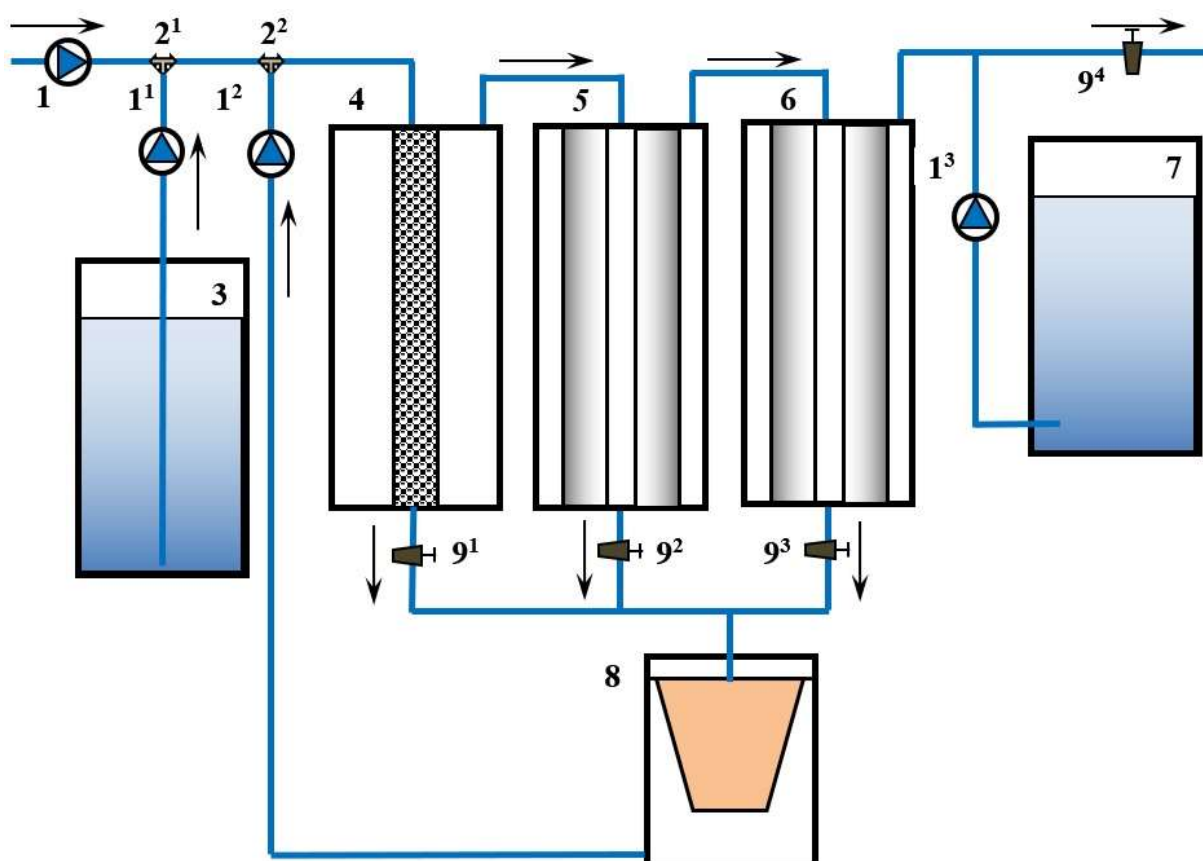


Рис. 7 – Залежність швидкості фільтрування суспензії в часі при  $K = [\text{PO}_4^3, \text{мг-екв}] / [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$ , різних концентраціях Magnofloc – 336 (мг/дм<sup>3</sup>), температурі розчину 21 °С, початковій жорсткості 27,0 мг-екв/дм<sup>3</sup> ( $[\text{Ca}^{2+}] = 13,5 \text{ мг-екв/дм}^3$ ;  $[\text{Mg}^{2+}] = 13,5 \text{ мг-екв/дм}^3$ ),  $\text{pH}_n = 7,4$  (б/ф – без флокулянта, д/в – дистильована вода)

Спираючись на отримані результати, ми розробили склад осаджувальної суміші для пом'якшення води в системах з малою та середньою продуктивністю. Окрім застосування додаткових реагентів у формі флокулянтів, нами було запропоновано замінити натрій фосфат ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ), використання якого призводить до підвищення рН очищеної води, на еквівалентну суміш  $[(0,75 \div 0,85) \text{ Na}_3\text{PO}_4 + (0,25 \div 0,15) \text{ NaH}_2\text{PO}_4]$ . Використання цієї суміші дозволяє отримати пом'якшену воду з низькою залишковою жорсткістю, при цьому рН води залишається нижчим за 8,5 [22]. Зрозуміло, що кількість флокулянту та співвідношення компонентів суміші залежать від вихідної жорсткості води, співвідношення між кальцієвими та магнієвими іонами, а також інших характеристик води, яку пом'якшують. Тому відповідні дози та співвідношення компонентів визначаються індивідуально для кожного конкретного складу води.

Проведені дослідження послужили основою для створення технологічної схеми пом'якшення води із застосуванням фосфатів. Ця технологія включає наступні етапи (рис. 8).



1 – насос; 2 – інжектор; 3 – бак осаджуючого розчину; 4 – блок змішування реагентів; 5 – механічний фільтр 20 мкм; 6 – механічний фільтр 5 мкм; 7 – бак пом'якшеної води; 8 – рукавний фільтр; 9 – електроклапан

**Рис. 8 – Технологічна схема пом'якшення води з використанням фосфатів**

В процесі пом'якшення води осаджуючий розчин насосом 1<sup>1</sup> подається в головну магістраль. При цьому утворена тверда фаза затримується в блоці змішування 4 та механічних фільтрах 5 та 6. Для забезпечення ефективної роботи системи пом'якшення передбачено періодичне промивання блоків 4 – 6 від накопиченої твердої фази. Для цього періодично насос подачі води 1 відключається, електроклапани 9<sup>1</sup>–9<sup>3</sup> відкриваються, а клапан 9<sup>4</sup> закривається. Далі насосом 1<sup>3</sup> блоки 4 – 6 промиваються зворотнім током води, а отримана суспензія перетікає в ємність з рукавним фільтром 8. Рідка фаза накопичується в нижній частині блоку 8 і при досягненні визначеного рівня відкачується насосом 1<sup>2</sup> в магістраль системи пом'якшення. Об'єм використаних ємностей визначається періодичність та тривалість процесу видалення твердої фази, початковою жорсткістю вхідної води, наявністю інших домішок, здатних утворювати в процесі пом'якшення тверду фазу, продуктивністю системи, об'ємом механічних фільтрів і т. п. Інжектори застосовані з метою забезпечення можливості використання дозуючих насосів низького тиску і можуть бути видалені при використанні інших типів насосів.

#### **Висновки**

З отриманих результатів можна зробити висновок, що для досягнення ефективного пом'якшення води за допомогою карбонату та гідроксиду натрію при низьких температурах і без процесу відстоювання необхідно збільшити дозу осаджувача в 5–10 разів від стехіометричної кількості. Проте навіть за таких умов застосування цього методу при низьких температурах і без відстоювання залишається малоєфективним і навряд чи може бути рекомендоване для використання в побуті чи для пом'якшення води в офісах.



Більш доцільним виявилось застосування фосфат-аніонів як осаджувачів, які також взаємодіють з іонами кальцію та магнію, утворюючи тверді частинки. Фосфати надійно реагують з іонами жорсткості в широкому діапазоні температур і рівнів рН, і лише при температурах нижче 5 °С їх ефективність знижується. Недоліком використання фосфатів є висока дисперсність сформованої твердої фази, що значно уповільнює процес розділення фаз шляхом фільтрації. Застосування аніонних флокулянтів дозволяє досягти швидкостей фільтрації, близьких до тих, що характерні для дистильованої води. Щоб підтримувати рівень рН пом'якшеної води в межах, встановлених нормативними документами, запропоновано використовувати як осаджувальний реагент суміш  $[(0,75 \div 0,85) \text{Na}_3\text{PO}_4 + (0,25 \div 0,15) \text{NaH}_2\text{PO}_4]$  з додаванням необхідної кількості флокулянту. Розроблено технологічну схему пом'якшення води, яка призначена для використання як етапу попередньої підготовки води в системах зворотного осмосу з малою та середньою продуктивністю.

**Перспективи подальших досліджень.** Для підтвердження отриманих результатів планується виготовити експериментальну установку та провести необхідні лабораторні дослідження в реальних умовах.

#### **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., Мякий Д. Д., Янковська С. 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 пом'якшенні 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. Сєвєродонецьк. – Сєвєродонецьк, 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 пом'якшення 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. Li N., Hefferen J.J., Li K. 2013. Quantitative Chemical Analysis, World Scientific Pub Co Inc.

17. Гордієнко К.Ю., Радовенчик Я. В., Крисенко Т. В., Радовенчик В.М. Ефективність висадження іонів кальцію з розведених водних розчинів у вигляді фосфатів / "Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки" №5, 2022 (313). – С. 134-140.
  18. Радовенчик Я. В., Гордієнко К. Ю., Крисенко Т. В., Радовенчик В. М., Ефективність видалення іонів магнію з води в процесах її пом'якшення/ Bulletin of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving». 2022. № 4 (21). – С. 88-94.
  19. Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 659 с.
  20. Радовенчик, В. М., Гордієнко, К. С., Радовенчик, Я. В., Крисенко, Т. В. Використання поверхнево-активних речовин для ефективного видалення часток фосфату кальцію із води. // Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 2022. – №3. – С. 94-102.
  21. Гордієнко, К. С., Радовенчик, Я. В. Використання флокулянтів в процесах пом'якшення води. // Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 2023. – №3. – С. 94-100.
  22. Патент на корисну модель №154768 Україна, МПК (2023.01) CO2F 5/00, CO2F 5/05 (2023.01). Спосіб пом'якшення води / Радовенчик Я. В., Гордієнко К. Ю. // Заявка № u 2023 02740; Заявл. 06.06.2023; Опубл. 13.12.2023 р., Бюл. №50.
- 

***Kateryna Hordiienko, Iaroslav Radovenchyk, Vyacheslav Radovenchyk, Oleg Bakunovsky***

#### **WATER SOFTENING TECHNOLOGIES FOR SMALL AND MEDIUM CAPACITY SYSTEMS**

*The current state of water resources is largely determined by human activities. The discharge of polluted waters into surface water bodies significantly reduces their quality and complicates direct usage. One of the main sources of increasing mineralization and hardness of surface waters is the discharge of spent regeneration solutions after ion-exchange softening, which creates a closed cycle of sodium, calcium, and magnesium chlorides. The need to reduce the intensity of this cycle and decrease environmental pollution has arisen long ago. Studying the standard soda-sodium softening method has shown its low suitability for systems with small and medium productivity due to the need for water heating and subsequent pH correction. Using phosphate anions as precipitants proved to be more effective, successfully removing calcium and magnesium ions over a wide range of temperatures and pH levels. Research has revealed that the formed solid phase in such treatment is poorly separated from the liquid. As one of the solutions to this problem, the use of anionic flocculants is proposed, which provide effective separation of the formed solid particles from the water. A technological scheme has been developed, which involves usage at the stage of preliminary water treatment for reverse osmosis systems with small and medium productivity.*

**Keywords:** *hardness, filtration, domestic water softening systems, flocculants, water treatment with phosphates, magnesium and calcium ions.*

#### **References**

1. Radovenchyk, Ya. V., Hordiienko, K. Yu., Radovenchyk, V. M., Krysenko, T. V. Features of Chemical Precipitation of Calcium Ions from Dilute Aqueous Solutions. // Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Series: Chemical Engineering, Ecology, and Resource Saving, 2022. - No. 2. – pp. 72–78.
2. Alipov A. N., Myahkyi D. D., Yankovska Ye. V. Water Supply for the Population, Industry, and Agriculture of Donbas. Utilization of Own Resources // Water and Water Treatment Technologies. – 2007. - No. 4. – pp. 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. – pp. 327–331.
4. DSanPiN 2.2.4-171-10 "Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption" - Order of the Ministry of Health of Ukraine dated May 12, 2010 No. 400.
5. Orlov V. O. Water Supply of Industrial Enterprises: Textbook / V. O. Orlov, L. L. Lytvynenko, A. M. Orlova. — Kyiv: Znannia, 2014. — 278 pages.

6. Dolinsky A. A., Obodovych O. M., Sydorenko V. V., Lymar A. Yu. Features of Water Treatment for Boiler Houses // *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 2021, Vol. 43, No. 4, pp. 17–24.
7. Zapolsky, A. K. *Water Supply, Sewerage, and Water Quality* - Kyiv: Vyscha Shkola, 2005 – 612 pages.
8. Hasson D., Cornel A. Effect of Residence Time on the Degree of CaCO<sub>3</sub> Precipitation in the Presence of an Antiscalant [J]. *Desalination*, 2017, 401: 64–67.
9. Fischer L., Hartmann S. S., Maljusch A., et al. The Influence of Anion-Exchange Membrane Nanostructure on Ion Transport: Adjusting Membrane Performance through Fabrication Conditions [J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 669: 121306.
10. Homelia I. M. Evaluation of the Efficiency of Cation Exchangers KU–2–8 and Aqualite K-100FC in Water Softening in the Presence of Iron Ions / I. M. Homelia, Yu. A. Omelchuk, V. M. Radovenchuk // *Ecotechnologies and Resource Saving*. – 2008. – No. 3. – pp. 62–65.
11. Tykhonova I., Matsievska O. The Problem of Using Ion-Exchange Materials in the Water Treatment Shop of Industrial Enterprises // *Installation Market*. – 2004. – No. 9. – pp. 22–23.
12. Ion-Exchange Purification of Water from Nitrates in Creating Energy-Efficient Technologies of Water Demineralization / Trus I. M., Homelia M. D., Krysenko T. V., Vorobyova V. I. // *Strategies for Sustainable Development: On the Way to a Stronger Community: Materials of the Scientific and Practical Conference*, October 21, 2016, Sievierodonetsk. – Sievierodonetsk, 2016. – pp. 272–274.
13. Ayrapetyan T. S. *Water Management of Industrial Enterprises: Textbook* – Kharkiv: KhNAMG, 2010. – 280 p.
14. Nazarenko O. S. Study of the Regeneration Process of Spent Cationite from the Water Softening Unit in Benzene Production at RCHZ "Zarya" / *Bulletin of the East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl*. – 2015, No. 7 (224). – pp. 32–36.
15. Shablii T. O., Radovenchuk V. M., Homelia M. D. Application of New Reagents in Industrial Water Consumption. – Kyiv: Infodruk, 2014. – 302 pages.
16. Li N., Hefferren J. J., Li K. *Quantitative Chemical Analysis*. World Scientific Publishing Co Inc., 2013.
17. Hordiienko K. Yu., Radovenchuk Ya. V., Krysenko T. V., Radovenchuk V. M. Efficiency of Precipitation of Calcium Ions from Dilute Aqueous Solutions in the Form of Phosphates / *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences Series*, No. 5, 2022 (313). – pp. 134–140.
18. Radovenchuk Ya. V., Hordiienko K. Yu., Krysenko T. V., Radovenchuk V. M. Efficiency of Removal of Magnesium Ions from Water in the Processes of Its Softening / *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Series: Chemical Engineering, Ecology, and Resource Saving*, 2022. No. 4 (21). – pp. 88–94.
19. Goranovsky I. T., Nazarenko Yu. P., Nekryach Ye. F. *Short Handbook of Chemistry*. – Kyiv: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1962. – 659 pages.
20. Radovenchuk V. M., Hordiienko K. S., Radovenchuk Ya. V., Krysenko T. V. Use of Surfactants for Effective Removal of Calcium Phosphate Particles from Water. // *Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Series: Chemical Engineering, Ecology, and Resource Saving*, 2022. – No. 3. – pp. 94–102.
21. Hordiienko K. S., Radovenchuk Ya. V. Use of Flocculants in Water Softening Processes. // *Bulletin of NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Series: Chemical Engineering, Ecology, and Resource Saving*, 2023. – No. 3. – pp. 94–100.
22. Utility Model Patent No. 154768 Ukraine, IPC (2023.01) C02F 5/00, C02F 5/05 (2023.01). Method of Water Softening / Radovenchuk Ya. V., Hordiienko K. Yu. // *Application No. u2023 02740; Filed on 06.06.2023; Published on 13.12.2023, Bulletin No. 50.*