

УДК 628.164-926.41

РАДОВЕНЧИК Я. В.\*<sup>1</sup>, ГОРДІСНКО К. Ю.<sup>1</sup>, БАКУНОВСЬКИЙ О. О.<sup>2</sup>, ІВАНОВА В. П.<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»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ПОМ'ЯКШЕННЯ ВОДИ СИЛКАТОМ НАТРІЮ

Сучасний стан природних вод вимагає попереднього пом'якшення більшості господарсько-питних та енергетичних вод. Тому пошук ефективних технологій та реагентів пом'якшення сьогодні особливо актуальний, а дослідження в цій галузі, зважаючи на інтенсивне погіршення якості природних вод, щорічно нарощуються. Центральне місце в таких дослідженнях займають процеси видалення з води іонів кальцію та магнію. Традиційно вважається, що іони магнію важче піддаються видаленню із води, ніж іони кальцію, оскільки утворюють менше нерозчинних сполук. Загальна ефективність процесів пом'якшення води одночасно залежить від залишкового вмісту обох катіонів. Тому дослідниками іонам магнію також приділяється достатньо уваги. Перспективними реагентами в таких процесах вважається гідроксид та фосфат натрію. Однак, використання першого пов'язано із значним зростанням водневого показника, а використання другого – із перевитратою реагенту та необхідністю підтримання для достатньої ефективності лужного середовища. Тому нами в межах даної роботи було досліджено ефективність силкату натрію в процесах видалення з водного середовища іонів магнію та кальцію. Характерною особливістю реакції утворення твердої фази між катіонами магнію та силкат – аніонами є значна залежність від водневого показника. В нейтральному середовищі утворення твердої фази в модельних розчинах візуально не фіксуються. Разом з тим, деяке зниження жорсткості після фільтрування через «синю стрічку» все ж спостерігається. І із збільшенням рН таке зниження зростає. Найбільша ефективність пом'якшення забезпечується при рівнях рН > 10. Не вдалося отримати якихось позитивних результатів і при вивченні процесів відстоювання та фільтрування сформованої твердої фази. При цьому співвідношення між компонентами та початкова жорсткість води на процес освітлення практично не впливає. Разом з тим, силкат натрію може бути досить ефективним при стехіометричних або більших співвідношеннях. Але суттєвим недоліком є значне підвищення водневого показника після змішування компонентів, що вимагає корегування рН в обробленій воді. А це ще один етап обробки води. Не вдалося отримати позитивні результати і при використанні в якості інтенсифікатора відстоювання та фільтрування гідроксиду алюмінію. При співвідношенні  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$  і різних дозах іонів алюмінію значної інтенсифікації процесів відстоювання в діапазоні доз іонів алюмінію 10–70 мг/дм<sup>3</sup> не спостерігається. А при дозах алюмінію менше 30 мг/дм<sup>3</sup> навіть спостерігається гальмування процесу відстоювання. Як і у випадку обробки силкатом натрію магній містких розчинів, осадження силкату кальцію в значній мірі залежить від водневого показника. Висока ефективність спостерігається лише в сильнолужному середовищі. За інших умов ефективність пом'якшення суттєво знижується. При надлишку чи нестачі осаджувача формуються більш компактні частки, що швидше осідають. В той же час, при стехіометричному чи близькому до нього співвідношенні між компонентами формуються частки розвинутої структури, котрі осідають в два рази повільніше і займають більший уявний об'єм. При стехіометричному співвідношенні компонентів швидкість суттєво гальмується, а при перевищенні  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}] \geq 1,0$  протягом перших 10 хв всі пори фільтру виявляються перекритими і транспортування рідкої фази припиняється. Зменшення початкової жорсткості до 20 мг-екв/дм<sup>3</sup> суттєво картину не змінює. Освітлення суспензії відбувається частково. Значна кількість завислих часток залишається в маточному розчині. Флокуюча здатність сполук кремнію в даних умовах не проявляється. При зниженні вмісту іонів кальцію до 10,2 мг-екв/дм<sup>3</sup> обробка еквівалентною кількістю силкату натрію не супроводжується утворенням твердої фази, котру можливо зафіксувати візуально. Хоча після фільтрування через «синю стрічку» жорсткість води знижується. Разом з тим, фільтраційні властивості твердої фази, що формується в процесі пом'якшення, мало відрізняються від фільтраційних властивостей карбонатів, фосфатів та гідроксидів, тому реагент не може бути рекомендований для застосування в системах малої та середньої продуктивності, де основним процесом розділення фаз є фільтрування.

**Ключові слова:** пом'якшення, силкати, кальцій, магній, видалення

DOI: 10.20535/2617-9741.2.2024.307362

\* Corresponding author: r.yar@ukr.net

Received 25 March 2024; Accepted 17 April 2024

**Постановка проблеми.** Сучасні зміни клімату та катастрофічний антропогенний вплив на довкілля суттєво погіршують якість води в більшості природних джерел, що потребує обов'язкової її попередньої обробки перед споживанням. Найчастіше не відповідають нормативним значенням такі параметри, як мінералізація та надмірний вміст іонів кальцію та магнію. Такі води заборонені до споживання людиною та не можуть використовуватися в промисловості. Особливо гостро така ситуація проявляється в східних та південних регіонах України і викликана скидами в гідросферу значних об'ємів стічних та шахтних вод. В результаті мінералізація та жорсткість вод в поверхневих водоймах за останні кілька десятиліть катастрофічно зросла. Не краща ситуація і з підземними водами, які також на значних територіях України характеризуються підвищеною мінералізацією та жорсткістю. Споживання людиною води з наднормативним вмістом іонів кальцію та магнію може супроводжуватися проблемами з опорно - руховим апаратом, погіршенням роботи серцево – судинної системи, відмовами нирок та жовчного міхура в результаті відкладання каменів. Використання жорстких вод в промисловості супроводжується зниженням ефективності обладнання, скороченням тривалості його безаварійної експлуатації, ростом затрат на ремонт та обслуговування. Оскільки тенденції щодо покращення якості запасів природних вод найближчим часом не спостерігається, то проблеми зниження жорсткості та мінералізації води стають все актуальнішими та гострими, а тому дослідження в зазначеній галузі завжди своєчасні та актуальні.

**Аналіз попередніх досліджень.** Допустимий вміст іонів кальцію та магнію, що визначає такий параметр води, як жорсткість, суттєво різниться для різних споживачів. Так, для вод, що споживаються людиною, чинними нормативними документами України допустима жорсткість води встановлена на рівні в 7 мг-екв/дм<sup>3</sup> [1]. При більших значеннях жорсткості вода підлягає попередньому пом'якшенню, оскільки споживання надмірно жорсткої води негативно впливає на людський організм. Окремі галузі промисловості виділяються значно жорсткішими вимогами до вод, що застосовують. Так, харчова промисловість потребує воду з жорсткістю на рівні 0,1 – 0,2 мг-екв/дм<sup>3</sup>, а енергетичні установки ефективно працюють лише з водами жорсткістю не більше 0,03 – 0,05 мг-екв/дм<sup>3</sup> [2]. На сьогодні досліджено багато технологій та підібрано достатньо реагентів для пом'якшення води. Традиційною вважається содово-вапняна та содово-натрієва технологія зниження жорсткості води. Основою технології є обробка жорсткої води спочатку карбонатом натрію для переведення в тверду фазу іонів кальцію, а потім вапном чи гідроксидом натрію для осадження іонів магнію [3]. Після тривалого відстоювання та розділення твердої та рідкої фаз оброблена вода має водневий показник на рівні 10,0 – 11,0, що вимагає його коригування. Для достатньої ефективності технології температура води повинна складати 35 – 40 °С. При цьому залишкова жорсткість води знижується до рівня в 0,5 – 1,0 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Зважаючи на простоту технології та обладнання, ця технологія пом'якшення сьогодні вважається базовою для використання в промисловості. Разом з тим, сьогодні існує гостра необхідність пом'якшення води безпосередньо в точках водовідбору – офісах, приватних господарствах, школах, дитсадках і т.п. Найбільшого поширення в цій галузі набули іонообмінні установки, що відрізняються високою ефективністю пом'якшення, але їх експлуатація супроводжується періодичним скидом в довкілля значних об'ємів регенераційних 10- чи 24 %-вих розчинів хлориду натрію [4,5]. Таким чином формується антропогенний цикл підвищення мінералізації поверхневих водойм, оскільки із незначною кількістю іонів жорсткості в довкілля скидається на порядки більша кількість хлориду натрію. Проведені нами дослідження показали неможливість використання содово-натрієвої технології пом'якшення для установок середньої та малої продуктивності із-за низької ефективності та значної перевитрати реагентів [6]. Не дозволяє вирішити проблему і використання поверхнево – активних речовин та фосфатів в якості осаджувача [7,8]. Тому на сьогодні пом'якшення води в точках водовідбору складає невирішену частину загальної наукової проблеми захисту гідросфери від антропогенного забруднення.

**Мета дослідження.** Одним із реагентів, що рекомендується для зниження жорсткості природних вод є силікат натрію [9]. В технологіях обробки води давно відоме застосування в якості неорганічного флокулянту активованої кремнієвої кислоти. Сировиною для приготування флокулянту є силікат натрію (рідке скло) та різноманітні активуючі агенти – кислоти, хлор, сполуки алюмінію і т.п. Флокулянт є аніонним поліелектролітом і орієнтований на взаємодію з позитивно зарядженими частками. З іншого боку, іони кальцію реагують з силікат – аніонами з утворенням нерозчинних сполук. Оскільки в науковій літературі детальних даних досліджень в цій галузі нам знайти не вдалося, то метою наших наступних досліджень було вивчення ефективності використання силікату натрію в якості осаджувача солей жорсткості та можливість використання його в системах пом'якшення малої та середньої продуктивності.

**Методика роботи.** Методика дослідження полягала в приготуванні модельних розчинів із різним вмістом іонів  $\text{Ca}^{2+}$  чи  $\text{Mg}^{2+}$  та обробці їх різними дозами силікату натрію ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) при різних співвідношеннях компонентів та різних значеннях рН і температури. Утворений осад відфільтровували відразу після зливання компонентів на «синій стрічці» та визначали залишкову жорсткість розчину шляхом титрування з використанням еріохрому чорного Т та трилону Б. Додатково проведені дослідження по вивченню інтенсивності освітлення оброблених розчинів з метою визначення найбільш оптимальних умов утворення компактного осаду та інтенсивності фільтрування з метою визначення можливості застосування в системах малої та середньої продуктивності. Для вивчення інтенсивності фільтрування використовували лабораторну лійку діаметром 5,5 см, в яку вкладався фільтр «біла стрічка» діаметром 110 мм. Фільтрування проводилося при максимальному заповненні лійки. Отримані результати порівнювалися з аналогічними результатами для дистильованої води.

**Виклад основного матеріалу.** На першому етапі основним об'єктом досліджень були іони магнію, як такі, що важче видаляються з водного середовища у вигляді нерозчинних сполук. Змінюючи співвідношення між силікат – іонами та іонами магнію, ми вивчали ефективність пом'якшення, інтенсивність освітлення отриманих суспензій та швидкість їх зневоднення фільтруванням. На жаль, детальної інформації щодо особливостей формування твердої фази при обробці вод із значною магнієвою жорсткістю силікатом натрію знайти не вдалося. Відсутні також відомості щодо ефективності пом'якшення води в різних умовах. Тому наступний цикл досліджень було присвячено саме процесам видалення іонів магнію з водного середовища у вигляді силікатів.

Як було нами встановлено в ході експериментів, ефективність процесів пом'якшення розчинів шляхом обробки силікатом натрію також недостатньо висока. Характерною особливістю реакції утворення твердої фази між катіонами магнію та силікат – аніонами є значна залежність від водневого показника (рис. 1). В нейтральному середовищі утворення твердої фази в модельних розчинах візуально досить важко зафіксувати. Разом з тим, деяке зниження жорсткості після фільтрування через «синю стрічку» все ж спостерігається. І із збільшенням рН таке зниження зростає. Якщо порівнювати із умовами формування гідроксиду магнію при регулюванні рН, то варто відмітити, що до рН 9,5 зниження магнієвої жорсткості в останньому випадку взагалі не спостерігається. Тому очевидно, що утворення твердої фази в модельних розчинах при обробці силікат – аніонами при рН < 9,5 зумовлено утворенням саме силікату магнію, а не гідроксиду. Маса такого осаду досить незначна, а найбільша ефективність пом'якшення забезпечується при рівнях рН > 10, що мало прийнятно для систем малої та середньої продуктивності.

Не вдалося отримати якихось позитивних результатів і при вивченні процесів відстоювання та фільтрування сформованої твердої фази. Як видно з рис. 2, пом'якшені розчини при початковій жорсткості 28,8 мг-екв/дм<sup>3</sup> освітлюються дуже повільно і через годину відстоювання займають майже весь об'єм маточного розчину. Виключення становить лише модельний розчин з К = 0,5, в якому формується значно менша кількість твердих часток. При цьому співвідношення між компонентами на процес освітлення

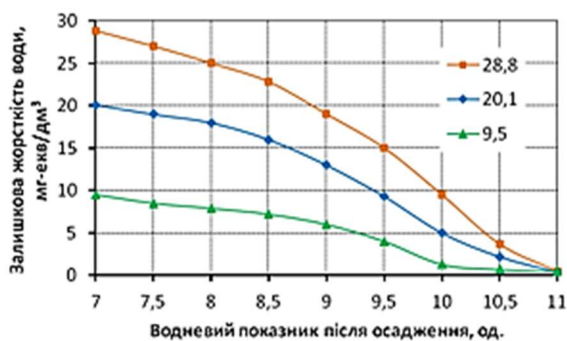


Рис. 1 – Залежність залишкової жорсткості води від рН після обробки еквівалентною кількістю силікат – аніонів та корегування водневого показника при різних початкових значеннях магнієвої жорсткості (мг-екв/дм<sup>3</sup>), (Т = 21 °С)

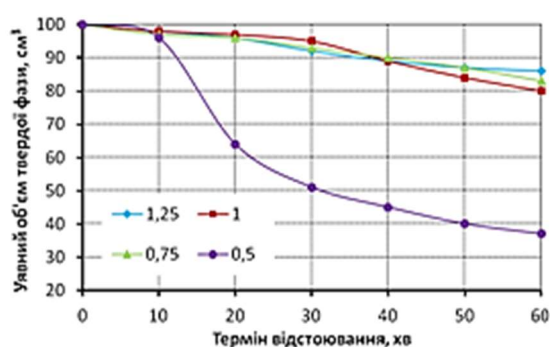


Рис. 2 – Криві відстоювання пом'якшених модельних розчинів при початковій жорсткості 28,8 мг-екв/дм<sup>3</sup>, різних співвідношеннях  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$ , (Т = 21 °С)

практично не впливає. Якість освітленого розчину досить висока і за характеристиками близька до фільтратів на «синій стрічці».

Не кращі результати отримані і при фільтруванні оброблених таким чином розчинів через фільтр «синя стрічка» (рис. 3). Як видно з рисунку, криві фільтрування в діапазоні  $K = 0,5 - 1,0$  практично мало відрізняються між собою, хоча і досить далекі від кривої фільтрування дистильованої води.

Оскільки початкова магнієва жорсткість на рівні  $28,8 \text{ мг-екв/дм}^3$  є досить значною і не характерною для вод суші, нами проведені аналогічні дослідження для модельних розчинів меншої початкової жорсткості –  $18,4$  та  $11,5 \text{ мг-екв/дм}^3$ . Отримані результати приведені в табл. 1.

**Таблиця 1 – Ефективність процесу пом'якшення води силікатом натрію  
(початкова жорсткість води –  $18,4 \text{ мг-екв/дм}^3$ ; температура –  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ )**

№ п/п	$K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$	Термін відстоювання чи фільтрування, хв	Об'єм фільтрату, $\text{см}^3$	Уявний об'єм осаду, % від початкового об'єму	pH після осадження	Залишкова жорсткість, $\text{мг-екв/дм}^3$
1	1,25	0	0	100	–	18,4
2		10	43	99	10,61	0,6
3		20	73	96		
4		30	83	88		
5		40	96	82		
6		50	98	73		
7		60	98	68		
8	1,00	0	0	100	10,55	1,5
9		10	34	98		
10		20	52	96		
11		30	65	91		
12		40	75	89		
13		50	88	87		
14		60	92	86		
15	0,75	0	0	100	10,51	6,0
16		10	47	99		
17		20	80	95		
18		30	93	90		
19		40	98	88		
20		50	98	86		
21		60	98	84		
22	0,5	0	0	100	9,95	9,5
23		10	56	96		
24		20	87	71		
25		30	97	51		
26		40	98	43		
27		50	98	40		
28		60	98	37		

Як видно з табл. 1, реагент може бути досить ефективним при стехіометричних або більших співвідношеннях. Разом з тим, суттєвим недоліком є значне підвищення водневого показника після змішування компонентів, що вимагає корегування pH в обробленій воді. А це ще один етап обробки води. Крім цього, якихось суттєвих відмінностей від результатів освітлення та фільтрування раніше вивчених суспензій не зафіксовано. Тому навіряд чи заміна фосфатів на силікати за даних умов буде доцільною.

Для розчинів з жорсткістю  $11,5 \text{ мг-екв/дм}^3$  по іонах магнію процес пом'якшення проходить надзвичайно нестабільно. При дозах силікату натрію вище стехіометрії тверда фаза візуально взагалі не фіксується, хоча

фільтрування на «синій стрічці» дозволяє знизити жорсткість з 11,5 до 0,6 мг-екв/дм<sup>3</sup>. При стехіометричному співвідношенні між компонентами в розчині формуються крупні агрегати, частина з яких спливає на поверхню, а частина осідає на дно посудини. При подальшому зменшенні дози осаджувача вся тверда фаза, утворена в процесі пом'якшення, спливає на поверхню і починає осідати лише після інтенсивного перемішування. При цьому якість освітлення невисока, навіть візуально спостерігаються завислі у водному середовищі окремі агрегати. Отримані в цій серії результати лише підтверджують висновок щодо недоцільності використання силікатів в процесах висадження іонів магнію, особливо в системах малої та середньої продуктивності, зроблений вище.

Не вдалося отримати позитивні результати і при використанні в якості інтенсифікатора відстоювання та фільтрування гідроксиду алюмінію (рис. 4). Як видно з рисунків, при співвідношенні  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$  і різних дозах іонів алюмінію значної інтенсифікації процесів відстоювання в діапазоні доз іонів

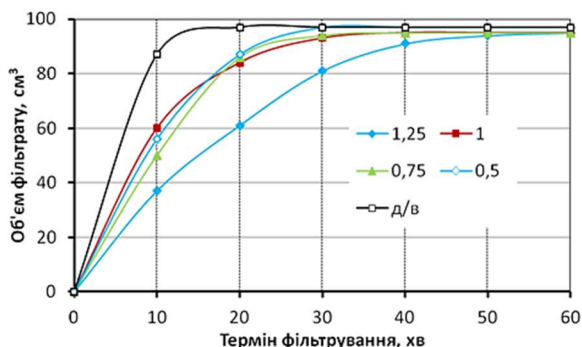


Рис. 3 – Криві фільтрування пом'якшених модельних розчинів при початковій жорсткості 28,8 мг-екв/дм<sup>3</sup>, різних співвідношеннях  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$ , ( $T = 21^\circ\text{C}$ , д/в – дистильована вода)

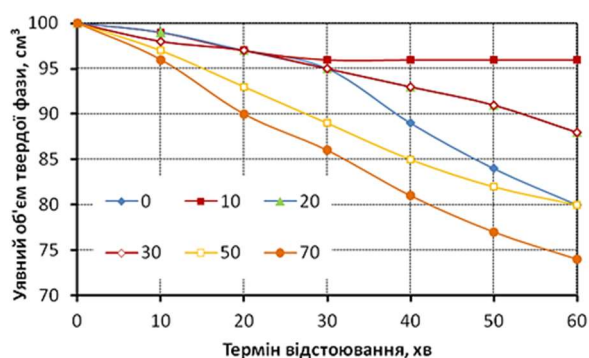


Рис. 4 – Криві відстоювання пом'якшених модельних розчинів при початковій жорсткості 28,8 мг-екв/дм<sup>3</sup>, співвідношенні  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$  та різних дозах іонів алюмінію (мг/дм<sup>3</sup>), ( $T = 21^\circ\text{C}$ )

алюмінію 10 – 70 мг/дм<sup>3</sup> не спостерігається. А при дозах алюмінію менше 30 мг/дм<sup>3</sup> навіть спостерігається гальмування процесу відстоювання. При дозах в 50 – 70 мг/дм<sup>3</sup> спостерігається незначне (в межах похибки експерименту) покращення процесу відстоювання, ефективність котрого не відповідає росту дози коагулянта.

Не краща ситуація і з процесами фільтрування (рис. 5). Будь-які дози коагулянта лише гальмують процеси фільтрування і не супроводжуються відповідним позитивним ефектом, а швидкість фільтрування далека від швидкості фільтрування дистильованої води.

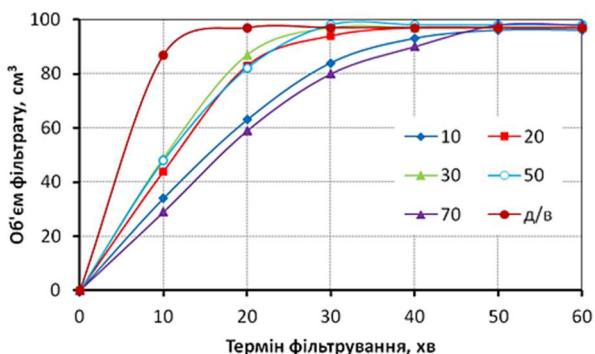


Рис. 5 – Криві фільтрування пом'якшених модельних розчинів при початковій жорсткості 28,8 мг-екв/дм<sup>3</sup>, співвідношенні  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$  та різних дозах іонів алюмінію (мг/дм<sup>3</sup>), ( $T = 21^\circ\text{C}$ , д/в – дистильована вода)

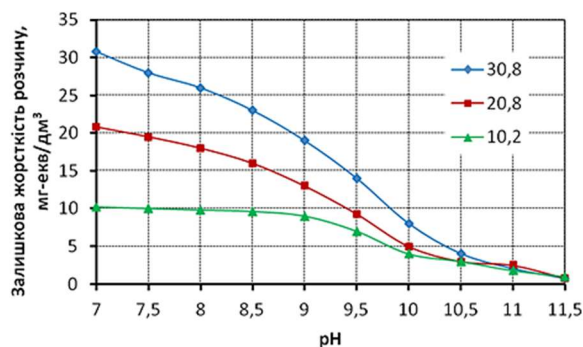


Рис. 6 – Залежність залишкової жорсткості води від рН після обробки еквівалентною кількістю силікат – аніонів та корегування водневого показника при різних початкових значеннях кальцієвої жорсткості (мг-екв/дм<sup>3</sup>), ( $T = 21^\circ\text{C}$ )

В цілому, можна вважати, що використання силікату натрію в процесах пом'якшення вод, що містять іони магнію, недоцільне. Виключення може складати варіант з проведенням пом'якшення при високих значеннях водневого показника та наступним його корегуванням шляхом додавання відповідної кількості кислоти. Але це можна виконувати і без використання силікату натрію.

Разом з тим, основним компонентом більшості природних вод на території України є іони кальцію, тому варто дослідити і процеси пом'якшення таких вод. Згідно [10], при осадженні у воді розчинність силікату кальцію сягає  $95 \text{ мг/дм}^3$ .

Встановлено, що як і у випадку обробки силікатом натрію магній містких розчинів, осадження силікату кальцію в значній мірі залежить від водневого показника (рис. 6). Висока ефективність спостерігається лише в сильнолужному середовищі. За інших умов ефективність пом'якшення суттєво знижується.

При пом'якшенні розчинів за таких умов якихось суттєвих змін в формуванні осаду силікатів кальцію не зафіксовано. Хоча варто відмітити, що при надлишку чи нестачі осаджувача формуються більш компактні частки, що швидше осідають. В той же час, при стехіометричному чи близькому до нього співвідношенні між компонентами формуються частки розвиненої структури, котрі осідають в два рази повільніше і займають більший уявний об'єм (рис. 7).

При цьому необхідно звернути увагу на те, що освітлена рідка фаза містить значну кількість завислих часток, котрі починають осідати лише через 1 – 1,5 год відстоювання. Таким чином, говорити про повноцінне освітлення за даних умов неможливо. Причому, співвідношення компонентів при цьому не впливає на ефективність процесу освітлення.

Небагато оптимізму викликає і фільтрування утворених часток силікату кальцію (рис. 8). При незначній кількості твердої фази ( $K = 0,5 - 0,75$ ) швидкість фільтрування близька до аналогічних параметрів для дистильованої води. При стехіометричному співвідношенні компонентів швидкість суттєво гальмується, а при перевищенні  $K \geq 1,0$  протягом перших 10 хв всі пори фільтру виявляються перекритими і транспортування рідкої фази припиняється. Якщо врахувати, що навіть при стехіометричному співвідношенні компонентів залишкова жорсткість обробленої води досить висока (табл. 2), позитивні результати фільтрування при зменшеній кількості твердої фази не мають вирішального значення.

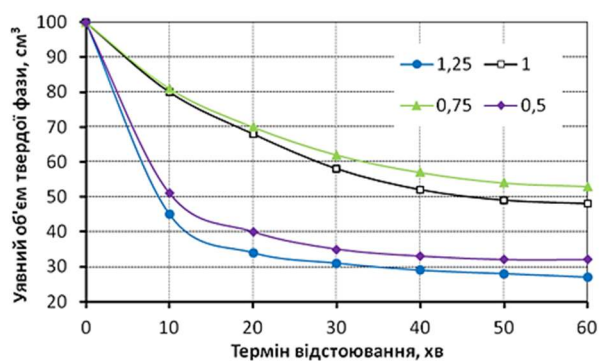


Рис. 7 – Криві відстоювання пом'якшених модельних розчинів при початковій жорсткості  $30,8 \text{ мг-екв/дм}^3$ , різних співвідношеннях  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{ мг-екв}]/[\text{Ca}^{2+}, \text{ мг-екв}]$ , ( $T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ )

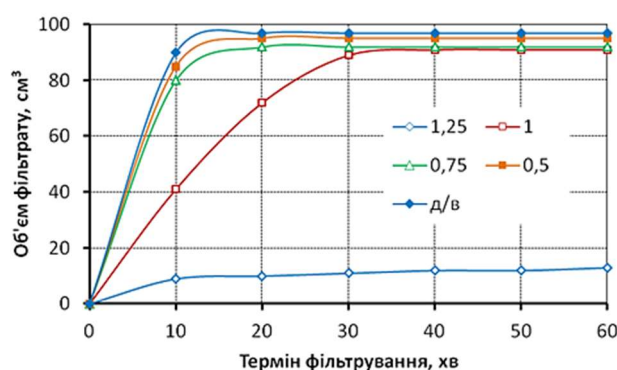


Рис. 8 – Криві фільтрування пом'якшених модельних розчинів при початковій жорсткості  $30,8 \text{ мг-екв/дм}^3$ , різних співвідношеннях  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{ мг-екв}]/[\text{Ca}^{2+}, \text{ мг-екв}]$ , ( $T = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Зменшення початкової жорсткості до  $20 \text{ мг-екв/дм}^3$  суттєво картину не змінює. Освітлення суспензії відбувається частково. Значна кількість завислих часток залишається в маточному розчині. Флокулююча здатність сполук кремнію в даних умовах не проявляється. При відстоюванні (рис. 9) при будь яких співвідношеннях компонентів освітлення суспензії відбувається практично по одній і тій же залежності. Криві осадження твердої фази для  $K = 0,5$  та  $K = 1,25$  накладаються, як і криві для  $K = 1$  та  $K = 0,75$ . Тому говорити про різницю в хімічному складі часток твердої фази досить важко. При необхідності варто провести більш розширений експеримент з аналізом структури осаду при різних умовах осадження силікату кальцію.

Таблиця 2 – Ефективність помякшення води силікатом натрію (температура – 21 °С)

Реагент	Початкова жорсткість, мг-екв/дм <sup>3</sup>	Залишкова жорсткість води при співвідношенні $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$			
		1,25	1	0,75	0,5
SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	30,8	0,7	1,5	5,3	10,5
	20,0	0,8	2,2	4,6	7,0
	10,2	1,8	3,0	4,9	8,8

Фільтрування отриманої суспензії показало (рис. 10), що тверда фаза, котра випадає при  $K = 0,5 - 0,75$  на швидкість транспортування води практично не впливає і відповідає швидкості транспортування дистильованої води. Однак залишкові концентрації іонів кальцію при цьому досить значні – 7,0 та 4,6 мг-екв/дм<sup>3</sup> відповідно. Тому очевидно, що за такої жорсткості води обробка силікатом натрію може

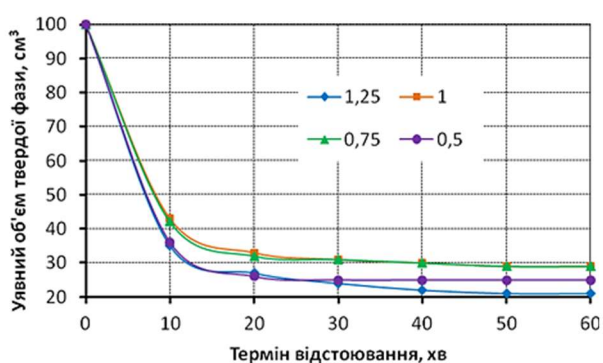


Рис. 9 – Криві відстоювання пом'якшених модельних розчинів при початковій жорсткості 20 мг-екв/дм<sup>3</sup>, різних співвідношеннях  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$ , (T = 21 °C)

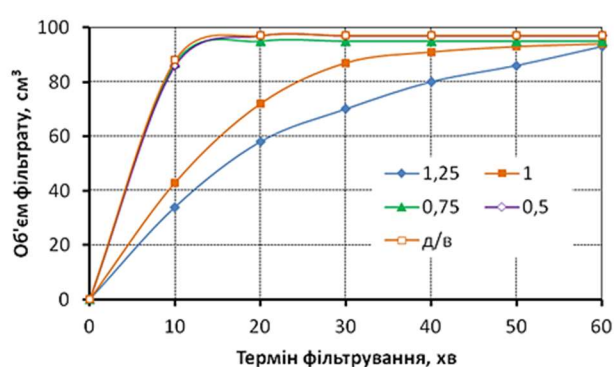


Рис. 10 – Криві фільтрування пом'якшених модельних розчинів при початковій жорсткості 20 мг-екв/дм<sup>3</sup>, різних співвідношеннях  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{мг-екв}]/[\text{Ca}^{2+}, \text{мг-екв}]$ , (T = 21 °C)

використовуватися як підготовча стадія перед більш глибоким очищенням та помякшенням.

Підтвердженням цього висновку є той факт, що при зниженні вмісту іонів кальцію до 10,2 мг-екв/дм<sup>3</sup> обробка еквівалентною кількістю силікату натрію не супроводжується утворенням твердої фази, котру можливо зафіксувати візуально. Хоча після фільтрування через «синю стрічку» жорсткість води знижується. Зважаючи на цей факт, силікат натрію за даних умов не може бути рекомендований до використання в системах пом'якшення води малої та середньої продуктивності при низьких показниках кальцієвої жорсткості.

**Висновки.** Проведені дослідження підтвердили можливість використання силікату натрію в процесах пом'якшення води. При цьому характерною особливістю використання цього реагенту є необхідність підтримання високого значення рН для забезпечення залишкової жорсткості обробленої води на рівні 0,6 – 2,5 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Причому, отримані результати забезпечуються при стехіометричних та більших співвідношеннях між компонентами. Разом з тим, фільтраційні властивості твердої фази, що формується в процесі пом'якшення, мало відрізняються від фільтраційних властивостей карбонатів, фосфатів та гідроксидів, тому реагент не може бути рекомендований для застосування в системах малої та середньої продуктивності, де основним процесом розділення фаз є фільтрування. В умовах можливості використання процесів відстоювання реагент забезпечує високу якість освітленої води, хоча уявний об'єм твердої фази залишається досить високим.

Перспективи подальших досліджень. Зважаючи на низьку швидкість освітлення обробленої води, вважаємо необхідним дослідити в майбутньому ефективність даного реагенту при одночасному вмісті в розчині іонів магнію та кальцію, а також вивчити вплив різноманітних флокулянтів на процес формування твердої фази.

#### **Список використаної літератури**

1. 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.
2. Орлов В. О. Водопостачання промислових підприємств: Навчальний посібник / В. О. Орлов, Л. Л. Литвиненко, А. М. Орлова. – К.: Знання, 2014. – 278 с.
3. Запольский, А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води - К.: Вища школа, 2005 – 612 с.
4. Іонообмінні технології. <https://ecosoft.ua/ua/blog/ionoobmennye-tehnologii/>
5. 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.
6. Радовенчик, Я. В., Гордієнко, К. Ю., Радовенчик, В. М., & Крисенко, Т. В. (2022). Особливості хімічного висадження іонів кальцію з розведених водних розчинів. Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (2), 72–78. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353>.
7. Радовенчик, В. М., Гордієнко, К. С., Радовенчик, Я. В., & Крисенко, Т. В. (2022). Використання поверхнево-активних речовин для ефективного видалення часток фосфату кальцію із води. Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, (3), 94–102. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265365>.
8. Гордієнко К., Радовенчик Я., Крисенко Т., Радовенчик В. Ефективність висадження іонів кальцію з розведених водних розчинів у вигляді фосфатів // Вісник Хмельницького національного університету, №5, 2022 (313). – С. 134 – 140.
9. Шаблій Т. О., Радовенчик В. М., Гомеля М. Д. Застосування нових реагентів в промисловому водоспоживанні. – К.: Інфодрук, 2014. – 302 с.
10. Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. – К.: Изд-во АН УССР, 1962. – 659 с.

---

*Iaroslav Radovenchyk, Kateryna Hordiienko, Oleg Bakunovsky, Veronika Ivanova*

#### **STUDY OF THE EFFICIENCY OF SODIUM SILICATE WATER SOFTENING PROCESSES**

*The current state of natural water resources requires preliminary softening for almost all drinking waters and waters for energy purposes. Therefore, the search for effective softening technologies and reagents is especially relevant today. Researches in this field are constantly increasing every year due the intensive quality deterioration of the natural waters. The processes of calcium and magnesium ions removing from water are on central place in such researches. It is traditionally considered that magnesium ions are more difficult to remove from water than calcium ions because magnesium ions form less quantity of insoluble compounds. The total efficiency of water softening processes depends on the residual content of both cations. Therefore, researchers also pay a lot of attention to magnesium ions removing. Sodium hydroxide and sodium phosphate are considered as a perspective reagents in such processes. However, the use of first reagent is associated with a significant increase of pH index, and the use of second reagent requires a big quantity of the reagent and needs the alkaline medium for sufficient efficiency. Therefore, in this work, we investigated the effectiveness of sodium silicate in the processes of magnesium and calcium ions removing from the aqueous medium. A characteristic feature of the solid phase formation in reaction between magnesium cations and silicate anions is the significant reaction dependence on the pH index. In neutral environment, the formation of a solid phase in model solutions was not visually fixed. However, some decrease of water hardness after filtering through "blue tape" filter paper is still observed. And it is decrease with increasing of pH index. The most effective softening process can be obtained at pH levels > 10. It was not possible to obtain any positive results during study of settling and filtering processes of the formed solid phase. At the same time, the ratio between the components and the initial water hardness does not affect the clarification process practically. However, sodium silicate can be quite effective in stoichiometric or higher ratios. But a significant disadvantage of such method is a*



pH index increasing when the components are mixed. It requires further adjusting the pH level in the treated water. And this is additional stage of water treatment. It was not possible to obtain positive results when aluminum hydroxide was used as a settling and filtering intensifier. With the ratio  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{mg-eq}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{mg-eq}] = 1$  and different doses of aluminum ions, there is no significant intensification of sedimentation processes in the range of aluminum ions doses from 10 to 70 mg/dm<sup>3</sup>. And with aluminum doses less than 30 mg/dm<sup>3</sup>, there is even inhibition of the settling process. Like in the case of sodium silicate treatment of magnesium containing solutions, the precipitation of calcium silicate strongly depends on the pH level. High efficiency of process is observed only in a highly alkaline environment. Under other conditions, the softening efficiency is significantly reduced. With an excess or lack of a precipitant, more compact particles are formed. The settling process for such particles occur more faster. At the same time, for a stoichiometric or near ratio between the components, particles of the branched structure are formed. Such particles settle twice slowly and occupy a larger imaginary volume. With a stoichiometric ratio of components, the speed is significantly slowed down, and when  $K = [\text{SiO}_3^{2-}, \text{mg-eq}]/[\text{Ca}^{2+}, \text{mg-eq}] \geq 1,0$  all filter pores are blocked during the first 10 min and liquid phase transportation stops. Reducing the initial water hardness to 20 mg-eq/dm<sup>3</sup> does not significantly change the situation. Clarification of the suspension occurs partially. A significant amount of suspended particles remains in the mother solution. The flocculating ability of silicon compounds does not appeared under these conditions. When the content of calcium ions is reduced to 10,2 mg-eq/dm<sup>3</sup>, treatment with an equivalent amount of sodium silicate does not lead to a solid phase formation. Although after filtering through the "blue tape" filter the water hardness decreases. At the same time, the filtration properties of the solid phase formed during the softening process are the same as the filtration properties of carbonates, phosphates and hydroxides, so the reagent cannot be recommended for use in low- and medium-productivity systems, where the filtration is a main phase separation process.

**Keywords:** water softening, silicates, calcium, magnesium, removal

#### References

1. DSanPiN 2.2.4-171-10 "Hygienic requirements for drinking water for human consumption". The decree of Ministry of Health of Ukraine, 12.05.2010, № 400.
2. Orlov, V.O., Lytvynenko, L.L., Orlova, A.M. (2014) *Vodopostachannia promyslovykh pidpriemstv: Navchalnyi posibnyk* [Water supply of industrial enterprises], K.: Znannia.
3. Zapolskyi, A. K. (2005) *Vodopostachannia, vodovidvedennia ta yakist vody* [Water supply, water drainage and water quality], K.: Vyscha shkola.
4. Ion exchange technologies (2024). Source: <https://ecosoft.ua/ua/blog/ionoobmennyie-tekhnologii>.
5. Trus, I.M., Gomelya, M.D., Krysenko, T.V., Vorobiova, V.I. (2016) *Ionoobminne ochyshchennia vody vid nitrativ pry stvorenni enerhoefektyvnykh tekhnolohii demineralizatsii vody* [Ion-exchange water purification from nitrates for energy-efficient water demineralization technologies] // *Stratohii staloho rozvytku: na shliakhu do sylnishoi hromady: materialy naukovo-praktychnoi konferentsii, Sievierodonetsk*.
6. Radovenchyk, I.V., Gordyenko, K. Y., Radovenchyk, V.M., Krysenko, T.V. (2022). *Osoblyvosti khimichnoho vysadzhennia ioniv kaltsiiu z rozvedenykh vodnykh rozchyniv*. [Features of chemical deposition of calcium ions from dilute aqueous solutions] // *Visnyk NTUU "KPI imeni Ihorya Sikorskoho"*. Serya: Khimichna inzheneriya, ekolohya ta resursozberezhennia, (2), p. 72-78. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353>.
7. Radovenchyk, V.M., Gordyenko, K.Y., Radovenchyk, I.V., Krysenko, T.V. (2022). *Vykorystannia poverkhnevo-aktyvnykh rehovyn dlia efektyvnoho vydalennia chastok fosfatu kaltsiiu iz vody* [Use of surfactants for effective removal of calcium phosphate particles from water] // *Visnyk NTUU "KPI imeni Ihorya Sikorskoho"*. Serya: Khimichna inzheneriya, ekolohya ta resursozberezhennia, (3), p. 94-102. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2022.265365>.
8. Gordyenko, K., Radovenchyk, I., Krysenko, T., Radovenchyk, V. (2022) *Efektyvnist vysadzhennia ioniv kaltsiiu z rozvedenykh vodnykh rozchyniv u vyhliadi fosfativ* [Effectiveness of calcium ions precipitation from dilute aqueous solutions in the phosphates form] // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu*, № 5, p. 134-140.
9. Shablii, T.O., Radovenchyk, V.M., Gomelya, M.D. (2014), *Zastosuvannia novykh reahentiv i tekhnolohii v promyslovomu vodospozhyvanni* [Application of new reagents and technologies in industrial water consumption], K.: Ihfodryk.
10. Horonovskyi, Y.T., Nazarenko, Yu.P., Nekriach, E.F. (1962) *Kratkyi spravochnyk po khymii* [A chemistry reference guide], K.: Izd-vo AN USSR.