

УДК 628.164-926.41

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

ВИСАДЖЕННЯ ІОНІВ МАГНІЮ ІЗ ВОДНИХ РОЗЧИНІВ РЕАГЕНТНИМ МЕТОДОМ

Сучасні тенденції в негативних змінах клімату та стану навколишнього середовища змушують приділяти більше уваги захисту довкілля та майбутньому людства. Особливо потерпає від антропогенної діяльності людини гідросфера, яка чи не найбільш чутлива до скидів різноманітних забруднюючих речовин. Не очищені чи недостатньо очищені стічні води при надходженні у поверхневі водойми та підземні горизонти суттєво знижують якість води в них та перешкоджають їх безпосередньому споживанню і використанню. Одночасно з масою різних забруднювачів до компонентів гідросфери скидаються відносно нетоксичні сполуки кальцію та магнію, котрі суттєво підвищують жорсткість води та її мінералізацію. Підвищені рівні жорсткості справляють негативний вплив як на окремі органи людини, так і на технологічне обладнання промислових підприємств. Класичною технологією зниження вмісту солей жорсткості сьогодні вважається реагентна содово-вапняна чи содово-натрієва технологія. Головними недоліками цих технологій є недостатня ефективність за звичайних температур навколишнього середовища та необхідність використання значної кількості реагентів. Найбільшого поширення сьогодні набула іонообмінна технологія пом'якшення води, але її застосування супроводжується скидом в гідросферу значних об'ємів регенераційних розчинів хлориду натрію з домішками сполук кальцію та магнію. Це зумовлює формування антропогенного кругообігу цих сполук. Тому завжди існувала необхідність в розробці та впровадженні екологічно безпечних процесів пом'якшення води. Одним з таких перспективних процесів зниження вмісту солей жорсткості сьогодні вважається електрохімічна технологія. Вона дозволяє регулювати рН без використання хімічних реагентів і переводити іони кальцію та магнію в твердий стан. Проведені нами дослідження показали, що навіть при підтриманні в катодному відділенні водневого показника на рівні 11,5–12,5 іони магнію не завжди швидко гідролізуються та можуть бути виведені з технологічного процесу. Причиною такої ситуації є тривалий інкубаційний період формування гідроксиду магнію та залежність властивостей сформованих твердих частинок від умов їх осадження. Оскільки для розведених розчинів при $\text{pH} \leq 11,3$ тверда фаза візуально взагалі не фіксується, діапазон досліджень було обмежено діапазоном в 11,5–12,5. Відстоювання отриманих при осадженні суспензій показало відсутність суттєвого впливу рН на швидкість відстоювання та фізико-хімічні властивості осаду. Не зафіксовано суттєвого впливу рН осадження і на параметри відділення твердої фази фільтруванням. Більш різноманітним виявився вплив температури. При температурах на рівні 10 °C в момент зливання розчинів тверда фаза взагалі візуально не фіксується. При відстоюванні спочатку починає спостерігатися помутніння розчину та формування вискодисперсних часток, котрі протягом годинного відстоювання практично не осідають. При початковій температурі модельних розчинів 21,3 та 41,7 °C після обробки гідроксидом натрію і відстоюванні спостерігається формування аморфних структур, котрі починають агрегуватися та спливати на поверхню маточного розчину. Освітлення розчину спостерігається одночасно по всьому об'єму. При осадженні за температури розчину в 32,1 °C спостерігається утворення розвинутих агрегатів пластівців по всьому об'єму, які відразу починають осідати на дно посудини. Таким чином, найбільш прийнятною температурою для осадження гідроксиду магнію реагентним методом з використанням гідроксиду натрію можна вважати температуру розчину на рівні 30 °C. Оскільки результати і відстоювання, і фільтрування виявилися незадовільними, було запропоновано використовувати рециркуляцію твердої фази. Показано, що рециркуляція осаду навіть в кількості 260 мг/дм³ дозволяє прискорити формування твердої фази та освітлення маточного розчину. При цьому загальний уявний об'єм твердої фази після відстоювання протягом 1 год суттєво не змінюється, незважаючи на значне збільшення її загальної маси. Спостерігається також підвищення ефективності видалення іонів магнію. В цілому, підбираючи рівень рН та температуру осадження, можливо забезпечувати необхідну ефективність пом'якшення.

Ключові слова: пом'якшення води, жорсткість, магній, гідроліз, електроліз, висадження

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2025.340383

* Corresponding author: pfbp21@gmail.com

Received 06 August 2025; Accepted 04 September 2025

Постановка проблеми. Стан більшості поверхневих водойм України сьогодні не відповідає нормам, встановленим діючими регламентами. Вода з таких джерел перед вживанням потребує додаткового очищення [1; 2; 3]. Найчастіше перевищення стосується таких показників, як загальна мінералізація і жорсткість. Подібна вода не тільки непридатна для вживання людиною, але й нерідко не відповідає вимогам промислового застосування. Особливо критична ситуація спостерігається в південних і східних областях, де у водойми масово скидаються шахтні води, що характеризуються високими значеннями мінералізації і жорсткості. У зазначених регіонах фіксується стабільне зростання цих параметрів. Проблема не обмежується лише поверхневими водами — підземні джерела у ряді районів країни також демонструють підвищену жорсткість. Необхідно відзначити, що тривале вживання жорсткої води може негативно позначатися на здоров'ї людини, зокрема на функціонуванні серцево-судинної і опорно-рухової систем, а також сприяти накопиченню солей кальцію та магнію у вигляді конкрементів у нирках чи жовчному міхурі. Зменшення обсягів якісних джерел питної води лише загострює проблему, посилюючи інтерес до методів її пом'якшення.

Аналіз попередніх досліджень. Жорсткість води головним чином зумовлена присутністю іонів магнію та кальцію. Відповідно до вимог українського законодавства, допустимий рівень жорсткості питної води обмежено значенням 7 мг-екв/дм³ [4]. Для виробництва продуктів харчування застосовують воду з жорсткістю від 0,1 до 0,2 мг-екв/дм³, а в енергетичному секторі — до 0,03–0,05 мг-екв/дм³ [5; 6]. Найбільш поширеним методом зниження жорсткості є содово-вапняна технологія, яка включає два основних етапи: спочатку додають натрієвий карбонат для осадження кальцієвих іонів, потім — вапно, що реагує з іонами магнію [7; 8]. Після цього відокремлюють утворений осад за допомогою фільтрації або відстоювання, а отриманий фільтрат доводять до нейтрального значення рН. При використанні цього методу можна досягти залишкової жорсткості на рівні 0,5–1,0 мг-екв/дм³. Максимальна ефективність досягається при підтримці температури в межах 35–40 °С. Попри промислове впровадження, деякі аспекти цієї технології залишаються недостатньо вивченими.

У випадках, коли йдеться про очищення незначних об'ємів води, широко використовують установки на основі іонного обміну [9; 10; 11]. Таке обладнання не потребує складного догляду та може працювати у напівавтоматичному або повністю автоматизованому режимі. Серед недоліків — утворення відходів, що містять натрій хлорид та сліди магнієвих і кальцієвих іонів. До того ж, експлуатаційні витрати зростають через необхідність витрачати до 30 % очищеної води на технічні процедури — промивання, регенерацію і спускування іонітів [12; 13; 14]. Основний екологічний виклик, пов'язаний з такими установками — вторинне забруднення водойм натрієвими солями та вилученими іонами твердості [15]. Це свідчить про необхідність не лише пом'якшувати воду, а й розробляти ефективні підходи до її знесолення.

Обидві описані вище технології пом'якшення характеризуються низькою ефективністю та доволі значним забрудненням гідросфери. В той же час, увагу багатьох фахівців останнім часом привертає можливість пом'якшення води в електролізерах різної конструкції. Найбільш прийнятним варіантом в даному випадку видаються конструкції електролізерів з діафрагмою чи іонообмінною мембраною. Однак, незважаючи на значну кількість публікацій у відповідних фахових виданнях, практичного використання зазначеної технології пом'якшення води в промислових масштабах зафіксувати не вдалося. Визначальну роль тут відіграють значні затрати електричної енергії при масштабних об'ємах води та досить незначна продуктивність вже готового обладнання. В той же час, як нам видається, така технологія може бути прийнятною для систем малої та середньої продуктивності (побутові та офісні системи). Тут і об'єми води незначні (в порівнянні з підприємствами), і, відповідно, затрати енергії можуть бути економічно виправданими.

Попередніми дослідженнями було встановлено [16], що в електролізері з діафрагмою досить просто створити в катодному відділенні рівень рН, що зумовлює гідроліз іонів магнію та переведення їх в твердий стан для ефективного відділення від рідкої фази. Одночасно було встановлено, що навіть при наявності в розчині необхідного рівня водневого показника, вміст іонів магнію знижується із значною затримкою. При цьому необхідно зважати на кілька факторів процесу електрохімічного пом'якшення води. Розчинність гідроксиду магнію згідно [17] при 20 °С складає 7 мг/дм³ (біля 0,6 мг-екв/дм³). Тому навіть теоретично досягнути зниження магнієвої жорсткості нижче цього рівня неможливо. Практичні аспекти формування гідроксиду магнію є досить складними, тому є необхідність розглянути їх більш детально.

Враховуючи викладене вище, **основною метою** проведених досліджень було вивчення основних особливостей реагентного осадження іонів магнію у водних розчинах та ефективності їх відділення від рідкої фази відстоюванням та фільтруванням.

Методика роботи. Вивчення особливостей реагентного осадження іонів магнію у водних розчинах проводили шляхом відбору проби об'ємом 100 см³ модельного розчину сульфату чи хлориду магнію жорсткістю 18 мг-екв/дм³ і обробки її розчином гідроксиду натрію при різних значеннях рН та температури. Далі отриману суспензію відстоювали в градуйованих циліндрах чи фільтрували через фільтр «біла стрічка» діаметром 90 мм, розміщений в стандартній лійці та оцінювали ефективність розділення фаз.

Виклад основного матеріалу. В процесі експериментів було встановлено, що навіть при реагентному осадженні іонів магнію процес проходить досить складно. В концентрованих розчинах утворення твердої фази відбувається в три етапи за схемою: «зародкові частинки → первісні частинки → сформовані кристали» [18]. Інкубаційний період формування твердої фази складає 5 – 20 хв. Важливим фактом є те, що в процесі формування твердої фази спостерігається зниження рН, що у випадку електрохімічного пом'якшення потребує деякого часу для відновлення вмісту іонів OH⁻. Автори [19] стверджують, що кристали Mg(OH)₂, синтезовані при температурі 2 °С, мають голкоподібну форму з довжиною 100 нм та діаметром 10 нм. При 10 °С можливо отримати частинки голкоподібної форми довжиною 4000 нм та діаметром 95 нм при повільному дозуванні розбавлених розчинів гідроксиду амонію. При температурах 20 °С формуються пластинчасті кристали діаметром 50 нм та товщиною 10 нм. [20]. Висока дисперсність твердої фази та значна її вологість суттєво знижує фільтрувальні властивості осаду та гальмує процеси видалення її з маточного розчину [21]. Відомі методи регулювання властивостей осаду шляхом зміни порядку зливання розчинів, рециркуляції твердої фази, зміни температури маточного розчину [22], додаткова обробка поверхнево-активними речовинами та хімічними реагентами і т. п. Автори [21] пропонують отримувати тверду фазу із найбільшим розміром кристалів шляхом регулювання величини пересичення лужних розчинів хлориду магнію. Однак, більшість вказаних пропозицій важко реалізуються в умовах електрохімічного пом'якшення розчинів без будь якого дозування додаткових хімічних реагентів. Тому нами було проведено більш детальні дослідження процесів формування твердої фази у вигляді сполук магнію при зміні рН в результаті обробки електричним струмом.

Очевидно, що визначальним в процесі електрохімічного пом'якшення води є рівень рН. Тому саме цьому параметру було приділено найбільше уваги. Проведені нами дослідження показали (рис. 1 - 2), що суттєво рівень водневого показника при реагентному пом'якшенні магній містких вод як на процес відстоювання, так і на процес фільтрування не впливає. Якщо з концентрованих розчинів гідроксид магнію можливо висадити вже при рН 8,22 – 9,86 [21], то із розчинів з магнієвою жорсткістю 18 мг-екв/дм³ при рН ≤ 11,3 тверда фаза візуально взагалі не фіксується. Тому діапазон наших досліджень обмежувався границями 11,5 – 12,5.

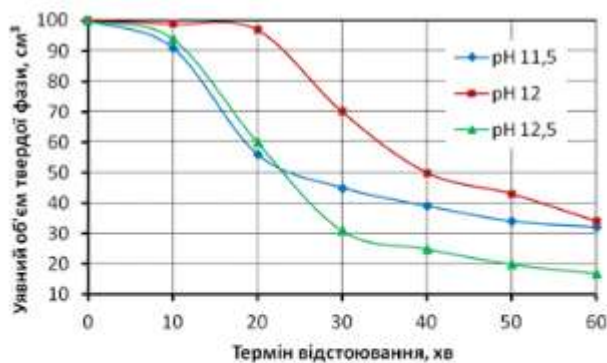


Рис. 1 – Криві відстоювання оброблених гідроксидом натрію магній містких розчинів з початковим вмістом іонів Mg²⁺ 18 мг-екв/дм³ при різних початкових значеннях водневого показника (t = 20 °C)

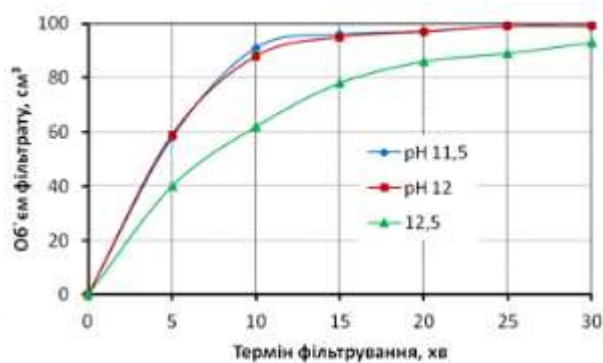


Рис. 2 – Криві фільтрування оброблених гідроксидом натрію магній містких розчинів з початковим вмістом іонів Mg²⁺ 18 мг-екв/дм³ при різних початкових значеннях водневого показника (t = 20 °C)

Як видно з рис. 1, швидше інших осаджується та займає найменший об'єм тверда фаза із суспензії, осадженої при рН 12,5. Гірше всього освітлюється суспензія, отримана при рН 12. Протягом 20 хв тверда фаза займає весь доступний об'єм, і лише потім починає освітлюватися. Причому, накопичення твердих часток фіксується як біля дна посудини, так і на поверхні рідкої фази. Графік освітлення суспензії, отриманої при рН 11,5, суттєво від описаних вище варіантів не відрізняється і займає приблизно проміжне положення. Як видно, вологість осаду досить висока і перевищує 98 – 99 %.

Щодо швидкості фільтрування, що більш важливо в умовах електрохімічного пом'якшення води, то тут відмічено стабільні результати в межах рН 11,5–12, і деяке погіршення фільтрувальних параметрів твердої фази для суспензії, отриманої при рН 12,5. Таким чином, регулювання водневого показника не дозволяє отримати осади гідроксиду магнію із прийнятними фільтрувальними властивостями.

Аналогічні дослідження впливу температури на фільтрувальні властивості осаду показали (рис. 3), що в дослідженому діапазоні температур чіткої залежності зміни властивостей осаду не зафіксовано. При температурах на рівні 10 °С в момент зливання розчинів тверда фаза взагалі візуально не фіксується. При відстоюванні починає спостерігатися помутніння розчину та формування високодисперсних часток, котрі протягом годинного відстоювання практично не осідають.

При початковій температурі модельних розчинів 21,3 та 41,7 °С після обробки гідроксидом натрію і відстоюванні спостерігається формування аморфних структур, котрі починають агрегатуватися та спливати на поверхню маточного розчину. Освітлення розчину спостерігається одночасно по всьому об'єму. При осадженні за температури розчину в 32,1 °С спостерігається утворення розвинутих агрегатів пластівців по всьому об'єму, які відразу починають осідати на дно посудини. В даному випадку, очевидно, щільність окремих частинок твердої фази більша від щільності води, на відміну від твердої фази, що формується при температурах 21,3 та 41,7 °С. Таким чином, найбільш прийнятною температурою для осадження гідроксиду магнію реагентним методом з використанням гідроксиду натрію можна вважати температуру розчину на рівні 30 °С. Більш точно прийнятний діапазон варто уточнювати при обробці вод, що містять одночасно іони магнію та іони кальцію. Варто звернути увагу і на те, що температура осадження також впливає на ефективність пом'якшення води. Як видно із табл. 1 (п. 1–7), основними факторами, які прийнятні для використання в умовах електрохімічного пом'якшення жорстких вод, є температура та їх водневий показник. Комбінування рівня цих двох факторів дозволяє забезпечувати необхідну ефективність пом'якшення.

Класичним рішенням підвищення ефективності розділення рідкої та твердої фаз є рециркуляція осаду, яка дозволяє забезпечити маточний розчин зародками для кристалізації та зменшити дисперсність твердої фази. Проведені нами дослідження із магній місткими модельними розчинами показали, що і в даному випадку можливе суттєве покращення загальних параметрів процесу пом'якшення. Як видно з рис. 4, рециркуляція осаду навіть в кількості 260 мг/дм³ дозволяє прискорити формування твердої фази та освітлення маточного розчину. При цьому загальний уявний об'єм твердої фази після відстоювання протягом 1 год суттєво не змінюється, незважаючи на значне збільшення загальної маси твердої фази.

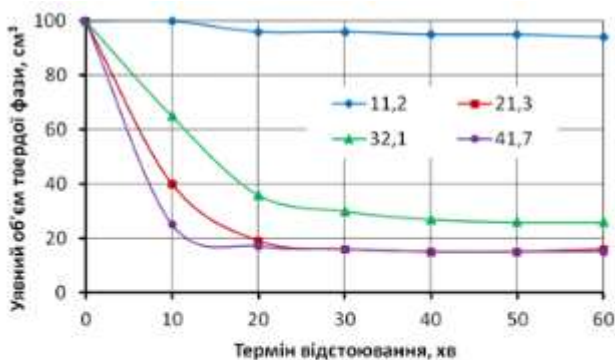


Рис. 3 – Криві відстоювання оброблених гідроксидом натрію магній містких розчинів з початковим вмістом іонів Mg^{2+} 18 мг-екв/дм³ при різних початкових значеннях температури розчину, °С (рН = 11,74)

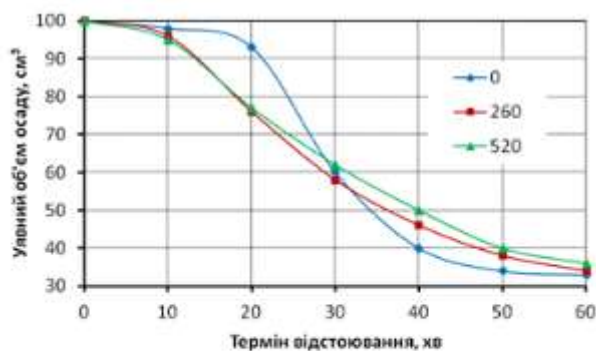


Рис. 4 – Криві відстоювання оброблених гідроксидом натрію магній містких розчинів з початковим вмістом іонів Mg^{2+} 18 мг-екв/дм³ при попередньому додаванні твердої фази в різних дозах (мг/дм³, t = 18,2 °С, рН 12,5)

Те ж можна відмітити і при фільтруванні отриманої за даних умов суспензії (рис. 5). Незважаючи на те, що з кожним циклом кількість твердої фази зростає, криві фільтрування практично накладаються. Це може свідчити про сформованість твердих часток вже на початковому етапі зливання розчинів та суттєве скорочення інкубаційного періоду, що дуже важливо в умовах електрохімічного пом'якшення магній містких вод.

Зниження водневого показника до pH 11,7 та підвищення температури розчину лише на кілька градусів дозволяє отримати аналогічні результати (табл. 1 п. 11–13). Відстоювання отриманих за таких умов суспензій показує, що надмірний вміст твердої фази дещо гальмує процес освітлення, очевидно, через недостатню сформованість утворених агрегатів (рис. 6).

Викладений висновок підтверджується і кривими фільтрування (рис. 7), з яких видно, що надмірна кількість твердої фази гальмує відділення утворених часток, на відміну від суспензії, осадженої при pH 12,5 (рис. 5).

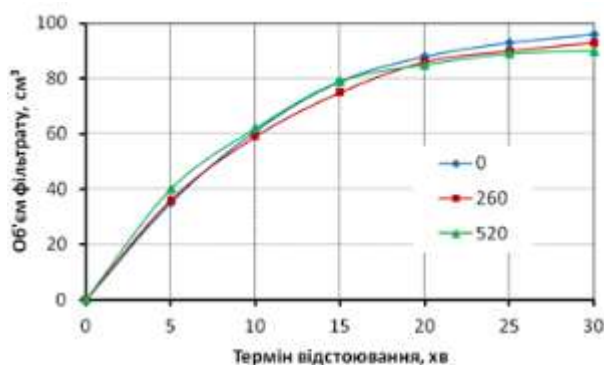


Рис. 5 – Криві фільтрування оброблених гідроксидом натрію магній містких розчинів з початковим вмістом іонів Mg^{2+} 18 мг-екв/дм³ при попередньому додаванні твердої фази в різних дозах (мг/дм³, $t = 18,2$ °C, pH 12,5)

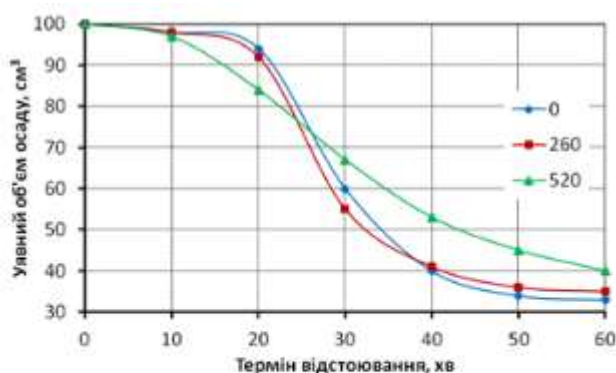


Рис. 6 – Криві відстоювання оброблених гідроксидом натрію магній містких розчинів з початковим вмістом іонів Mg^{2+} 18 мг-екв/дм³ при попередньому додаванні твердої фази в різних дозах (мг/дм³, $t = 21,4$ °C, pH 11,7)

Таблиця 1 – Результати реagentного пом'якшення води

№ п/п	Ж _п , мг-екв/дм³	К, мг/дм³	T, °C	pH, од.	Ж _з , мг-екв/дм³
1	18	-	20	11,5	15
2		-		12	3,6
3		-		12,5	1,3
4		-	11,2	11,75	16,3
5	260	-	21,3		8,8
6		-	32,1		5,2
7		-	41,7		3,1
8		-	18,2	12,5	2,2
9	520	-			1,6
10		260			1,0
11		520			4,2
12	260	-	21,8	11,7	3,1
13		520			1,6

Ж_п – початкова жорсткість розчину; Ж_з – залишкова жорсткість після 20 хв фільтрування; T – температура розчину; К – концентрація доданої твердої фази

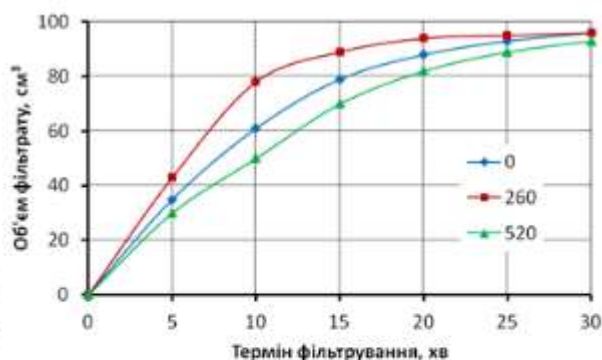


Рис. 7 – Криві фільтрування оброблених гідроксидом натрію магній містких розчинів з початковим вмістом іонів Mg^{2+} 18 мг-екв/дм³ при попередньому додаванні твердої фази в різних дозах (мг/дм³, $t = 21,4$ °C, pH 11,7)

В результаті в реальних технологіях електрохімічного пом'якшення природних вод варто передбачати рециркуляцію частини утвореної твердої фази в катодне відділення для скорочення інкубаційного періоду утворення твердих частинок та інтенсифікації процесів відділення їх від рідкої фази. Це дещо знизить продуктивність обладнання, але суттєво підвищить ефективність пом'якшення з рахунок зниження залишкових концентрацій іонів магнію (табл. 1 п. 8–13).

Висновки. Гідроліз іонів магнію відрізняється тривалим інкубаційним періодом, а фізико-хімічні властивості утвореної твердої фази насприяють ефективному відділенню її від водного середовища відстоюванням чи фільтруванням. Як один з варіантів покращення ситуації в умовах електрохімічного пом'якшення води може бути рециркуляція осаду. При цьому рН необхідно підтримувати в діапазоні 11,5–12,5, а температуру води, що пом'якшується, на рівні 30 °С. Зміна рН в зазначених межах суттєво на фізико-хімічні властивості осаду та ефективність його відділення від рідкої фази не впливає, а при зазначеній температурі спостерігається освітлення обробленого розчину та локалізація осаду на дні посудини.

Список використаної літератури

1. Радовенчик, Я. В., Гордієнко, К. Ю., Радовенчик, В. М., Крисенко, Т. В. Особливості хімічного висадження іонів кальцію з розведених водних розчинів. // Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 2022. - №2. - С. 72–78.
2. Аліпов А. Н., Мягкий Д. Д., Янковська Є. В. Водозабезпечення населення, промисловості та сільського господарства Донбасу. Використання власних ресурсів // Вода і водоочисні технології. – 2007. - №4. – с. 17-22.
3. Goncharuk V. V., Kucheruk D. D., Skubenko V. F., Badekha V. P., Kochkodan V. M. Prospect of baromembrane desalination of brackish waters of south of Ukraine // Desalination. – 2001. – Vol. 139. – p. 327-331.
4. ДСанПіН 2.2.4-171-10 "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" - Наказ Міністерства охорони здоров'я України 12.05.2010 р. № 400.
5. Орлов В. О. Водопостачання промислових підприємств: Навчальний посібник / В. О. Орлов, Л. Л. Литвиненко, А. М. Орлова. — К.: Знання, 2014. — 278 с.
6. Долінський А. А., Ободович О. М., Сидоренко В. В., Лимар А. Ю. Особливості водопідготовки для котельних / Теплофізика та теплоенергетика, 2021, т.43, №4, с. 17-24
7. Запольский, А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води - К.:Вища школа, 2005 – 612 с.
8. Hasson D, Cornel A (2017) Effect of residence time on the degree of CaCO₃ 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. Сєверодонецьк. – Сєверодонецьк, 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. Вощенко Б. А., Радовенчик В. М., Каравацька В. В., Радовенчик Я. В. Особливості пом'якшення води в двокамерному електролізері. Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2025. - № 1, 68 – 74. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2025.325848>
17. Гороновский И. Т., Назаренко Ю. П., Некряч Е. Ф. Краткий справочник по химии. Киев : Изд-во АН УССР, 1962. 659 с.
18. Сичов М. І., Коломієць Л. В., Боряк К. Ф. Вивчення умов отримання сполук магнію особливої чистоти з його хлориду // Збірник наукових праць ОДАТРЯ, 2017. - №1(10). – С. 10 – 14.
19. Jianping Lv, Longzhen Oiu and Baojun Ou. Controlled synthesis of magnesium hydroxide nanoparticles with different morphological structures and related properties in flame retardant ethylene-vinyl acetate blends // Nanotechnology 15, pp. 1576–1581 (2004).
20. Chenglin Yana, Dongfeng Xuea, Longjiang Zoub, Xiaoxing Yana and Wen Wang. Preparation of magnesium hydroxide nanoflowers // Journal of Crystal Growth, 282 (3 – 4), pp. 448–454 (2005).
21. Сичов М. І. Особливості осадоутворення гідроксиду магнію при направленому гідролізі в розчинах хлориду магнію // Збірник наукових праць ОДАТРЯ, 2021. - №1(18). – С. 6–14.
22. Миронюк І. Ф. Будова та морфологічні особливості частинок гідроксиду магнію, одержаного методом осадження / І. Ф. Миронюк, В. Л. Челядин, В. О. Коцюбинський, І. Ю. Костів, У. Я. Джуря // Фізика і хімія твердого тіла, 2008. – Т. 9, № 3. – С. 555–563.

Vyacheslav Radovenchyk, Bohdan Voshchenko, Yaroslav Radovenchyk, Tamara Krysenko

PRECIPITATION OF MAGNESIUM IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY REAGENT METHOD

Current trends in negative climate and environmental changes force us to pay more attention to environmental protection and the future of humanity. The hydrosphere, which is perhaps the most sensitive to discharges of various pollutants, suffers especially from human anthropogenic activity. Untreated or insufficiently treated wastewater, when entering surface water bodies and underground horizons, significantly reduces the quality of water in them and prevents their direct consumption and use. At the same time, along with a mass of various pollutants, relatively non-toxic calcium and magnesium compounds are discharged into the components of the hydrosphere, which significantly increase the hardness of water and its mineralization. Increased levels of hardness have a negative impact on both individual human organs and the technological equipment of industrial enterprises. The classic technology for reducing the content of hardness salts today is considered to be the reagent soda-lime or soda-sodium technology. The main disadvantages of these technologies are insufficient efficiency at normal ambient temperatures and the need to use a significant amount of reagents. The most widespread today is the ion-exchange technology of water softening, but its use is accompanied by the discharge into the hydrosphere of significant volumes of regeneration solutions of sodium chloride with impurities of calcium and magnesium compounds. This leads to the formation of an anthropogenic cycle of these compounds. Therefore, there has always been a need to develop and implement environmentally safe water softening processes. One of such promising processes for reducing the content of hardness salts is electrochemical technology today. It allows you to regulate the pH without the use of chemical reagents and transfer calcium and magnesium ions to a solid state. Our studies have shown that even when maintaining the hydrogen indicator in the cathode compartment at a level of 11.5-12.5, magnesium ions are not always quickly hydrolyzed and can be removed from the technological process. The reason for this situation is the long incubation period of magnesium hydroxide formation and the dependence of the properties of the formed solid particles on the conditions of their deposition. Since for diluted solutions at $\text{pH} \leq 11.3$ the solid phase is not visually fixed at all, the range of studies was limited to the range of 11.5-12.5. The settling of the suspensions obtained during precipitation showed the absence of a significant effect of pH on the settling rate and physicochemical properties of the precipitate. No significant effect of the pH of precipitation was recorded on the parameters of separation of the solid phase by filtration. The effect of temperature was more diverse. At temperatures of 10 °C at the time of decantation of the solutions, the solid phase is not visually fixed at all. During settling, turbidity of the solution and the formation of highly dispersed particles begin to be observed at first, which practically do not settle during the hour of settling. At the initial temperature of the model solutions of 21.3 and 41.7 °C, after treatment with sodium hydroxide and settling, the formation of amorphous structures is observed, which begin to aggregate and float to the surface of the mother liquor. The solution lightens simultaneously throughout the volume. When settling at a solution temperature of 32.1 °C, the formation of developed aggregates of flakes is observed throughout the volume, which immediately begin to settle to the bottom of the vessel. Thus, the most acceptable temperature for the precipitation of magnesium hydroxide by the reagent method using sodium hydroxide can be considered a solution temperature of 30 °C. Since the results of both settling and filtering were unsatisfactory, it was proposed to use solid phase recirculation. It was shown that the recirculation of the precipitate even in an amount of 260 mg/dm³ allows to accelerate the formation of the solid phase and clarification of the mother liquor. At the same time, the total apparent volume of the solid phase after settling for 1 h does not change significantly, despite a significant increase in its total mass. An increase in the efficiency of magnesium ion removal is also observed. In general, by selecting the pH level and precipitation temperature, it is possible to ensure the necessary softening efficiency.

Keywords: water softening, hardness, magnesium, hydrolysis, electrolysis, leaching

References

1. Radovenchyk, Ya. V., Hordienko, K. Yu., Radovenchyk, V. M., Krysenko, T. V. (2022). Osoblyvosti khimichnoho osadzhennya ioniv kal'tsiyu z rozbavlenykh vodnykh rozchyniv [Features of Chemical Precipitation of Calcium Ions from Dilute Aqueous Solutions]. *Visnyk Igor Sikorsky Kyiv Politechnic Institut. Himichna inzheneriia, ekologiia ta resursozberezhennia*. no. 2 (21). pp. 72–78. doi: <https://doi.org/10.20535/2617-9741.2.2022.260353>
2. Alipov A. N., Myahkyi D. D., Yankovska Ye. V. (2007). Vodopostachannya naselennya, promyslovosti ta sil's'koho hospodarstva Donbasu. Vykorystannya vlasnykh resursiv [Water Supply for the Population, Industry, and Agriculture of Donbas. Utilization of Own Resources]. *Voda ta vodochysni tekhnolohiyi*. no. 4. pp. 17–22.

3. Goncharuk V. V., Kucheruk D. D., Skubenko V. F., Badekha V. P., Kochkodan V. M. (2001). Prospect of Baromembrane Desalination of Brackish Waters of South of Ukraine. *Desalination*. vol. 139, article 00326. doi: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00326-5](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00326-5)
4. DSanPiN 2.2.4-171-10. (2010). Hiihyenichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoï dlya prozhyvannya lyudey [Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption]. *Order of the Ministry of Health of Ukraine*. dated May 12. no. 400.
5. Orlov V. O., Lytvynenko L. L., Orlova A. M. (2014). Vodopostachannya promyslovykh pidpryyemstv [Water Supply of Industrial Enterprises]. Kyiv: Znannia. 278 p.
6. Dolinsky A. A., Obodovych O. M., Sydorenko V. V., Lymar A. Yu. (2021). Osoblyvosti vodopidhotovky dlya kotelen [Features of Water Treatment for Boiler Houses]. *Teplofizyka i teploenerhetyka*. vol. 43, no. 4. pp. 17–24. doi: <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2021.2>
7. Zapolsky A. K. (2005). Vodopostachannya, vodovidvedennya ta yakist' vody [Water Supply, Sewerage, and Water Quality]. Kyiv: Vyshcha Shkola. 612 p.
8. Hasson D., Cornel A. (2017). Effect of Residence Time on the Degree of CaCO₃ Precipitation in the Presence of an Antiscalant. *Desalination*. vol. 401. pp. 64–67. doi: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.06.006>
9. Fischer L., Hartmann S. S., Maljusch A., et al. (2023). The Influence of Anion-Exchange Membrane Nanostructure on Ion Transport: Adjusting Membrane Performance through Fabrication Conditions. *Journal of Membrane Science*. vol. 669 article 121306. doi: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.121306>
10. Homelia I. M., Omelchuk Yu. A., Radovenchyk V. M. (2008) Otsinka efektyvnosti kationitiv KU–2–8 ta Akvalayt K-100FTS dlya pom"yakshennya vody v prysutnosti ioniv zaliza [Evaluation of the Efficiency of Cation Exchangers KU–2–8 and Aqualite K-100FC in Water Softening in the Presence of Iron Ions]. *Ekotekhnolohiyi ta resursozberezhennya*. no. 3. pp. 62–65.
11. Tykhonova I., Matsievska O. (2004). Problema vykorystannya ionoobminnykh materialiv u vodoochysnykh tsekhakh promyslovykh pidpryyemstv [The Problem of Using Ion-Exchange Materials in the Water Treatment Shop of Industrial Enterprises]. *Rynok instalyatsiy*. no. 9. pp. 22–23.
12. Trus I. M., Homelia M. D., Krysenko T. V., Vorobyova V. I. (2016). Ionoobminne ochyshchennya vody vid nitrativ u stvorenni enerhoefektyvnykh tekhnolohiy demineralizatsiyi vody [Ion-Exchange Purification of Water from Nitrates in Creating Energy-Efficient Technologies of Water Demineralization]. *Strategies for Sustainable Development: On the Way to a Stronger Community: Proceedings of Scientific and Practical Conference*. Sievierodonetsk. pp. 272–274.
13. Ayrapetyan T. S. (2010). Vodne hospodarstvo promyslovykh pidpryyemstv [Water Management of Industrial Enterprises]. Kharkiv: KhNAMG. 280 p.
14. Nazarenko O. S. (2015) Doslidzhennya protsesu reheneratsiyi vidprats'ovanoho kationitu z ustanovky pom"yakshennya vody vyrobnytstva benzolu na RCHZ «Zorya» [Study of the Regeneration Process of Spent Cationite from the Water Softening Unit in Benzene Production at RCHZ "Zarya"] *Visnyk skhidnoukrayins'koho natsional'noho universytetu imeni Volodymyra Dala*. no. 7 (224). - pp. 32–36.
15. Shablii T. O., Radovenchyk V. M., Homelia M. D. (2014). Zastosuvannya novykh reahentiv u promyslovomu vodospozhyvanni [Application of New Reagents in Industrial Water Consumption]. Kyiv: Infodruk. 302 p.
16. Voshchenko, B., Radovenchyk, V., Karavats'ka, V., & Radovenchyk, Y. (2025). Features of water softening in a two-chamber electrolyzer. *Bulletin of NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»*, *Series «Chemical Engineering, Ecology and Resource Saving»*, (1), 68–74. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.1.2025.325848>
17. 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.
18. Sychev M. I., L. V. Kolomiets, and K. F. Boryak, (2017). Study of conditions under which high purity magnesium compounds are obtained from its chloride. *Collection of scientific works of the odesa state academy of technical regulation and quality*. 1 (10), 10-14. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2017-1-10-10-14>
19. Jianping Lv, Longzhen Oiu and Baojun Ou, (2004). Controlled synthesis of magnesium hydroxide nanoparticles with different morphological structures and related properties in flame retardant ethylene-vinyl acetate blends // *Nanotechnology* 15, pp. 1576 – 1581.
20. Chenglin Yana, Dongfeng Xuea, Longjiang Zoub, Xiaoxing Yana and Wen Wanga, (2005). Preparation of magnesium hydroxide nanoflowers // *Journal of Crystal Growth*, 282 (3 – 4), pp. 448 – 454.
21. Sychoy M. I., (2021). Features of magnesium hydroxide precipitation during directional hydrolysis in solutions of magnesium chloride. *Collection of scientific works of the odesa state academy of technical regulation and quality*. 1(18). 6-14. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2021-1-18-6-14>
22. Myronyuk I.F. (2008). The Structure and Morphological Special Features of Milk Magnesia Prepared by Precipitated Method / I.F. Myronyuk, V.L. Chelyadyn, V.O. Kotsyubynsky, I.Yu. Kostiv, U.Ya. Dgura. *Physics and chemistry of solid state*. V. 9, № 3. 555-563.

За проханням колективу авторів публікації

Вагін А.В., Іваненко О.І., Панов Є.М., Іванюта С.П., Мартинюк А.С. 2025. Стратегія мінімізації екологічних ризиків від ПрАТ «Укрграфіт» в контексті сталого розвитку. Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2 (Чер 2025), 70–82.

редакція журналу вносить корективи в літературні джерела статті з представленням посилання

[6] Турос О.І., Петросян А.А., Маремуха Т.П., Моргульова В.В., Михіна Л.І., Брезіцька Н.В., Давиденко Г.М., Кобзаренко І.В., Сидоренко О.О, Царенок Т.В., Мазур В.О., Бондаренко О.М., Шарай Т.Г. 2023. Звіт про наукову-дослідну роботу «Оцінка ризику для здоров'я населення, обумовленого забрудненням атмосферного повітря викидами стаціонарних джерел ПРИВАТНОГО АКЦІОНЕРНОГО ТОВАРИСТВА «УКРАЇНСЬКИЙ ГРАФІТ». ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМНУ». Том 1 (Лист 2023), 141.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Антонюк Сергій Ігорович, доктор технічних наук, професор, завідувач інституту інженерії частинок Рейнланд-Пфальцького технічного університету Кайзерслаутерн-Ландау, м. Кайзерслаутерн (Німеччина) <https://orcid.org/0000-0001-8068-1683>

Артюх Любов Олексіївна, кандидат біологічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, відділ репродукції вірусів, Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України <https://orcid.org/0000-0003-3163-2492>

Бичко Ігор Богданович, кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України відділу каталітичних синтезів на основі одновуглецевих молекул <https://orcid.org/0000-0002-4164-3024>

Біганський Богдан Миколайович, аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0008-0861-9162>

Войтенко Кароліна Олегівна, магістрантка факультету автоматизації, промислової інженерії та екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0009-0008-5873-8573>

Вощенко Богдан Анатолійович, аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0009-0002-6502-0910>

Гнатюк В'ячеслав Володимирович, аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0009-0000-0709-0246>

Гондях Олександр Володимирович, доктор технічних наук, професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0000-0003-2490-2829>

Демченко Валерій Леонідович, доктор хімічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник відділу зварювання пластмас Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України <https://orcid.org/0000-0001-9146-8984>

Загородня Світлана Дмитрівна, кандидат біологічних наук, старший дослідник, завідувача відділом репродукції вірусів Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України <https://orcid.org/0000-0002-0892-772X>

Заремба Поліна Юрївна, аспірант, провідний інженер відділу репродукції вірусів Інституту мікробіології і вірусології імені Д. К. Заболотного НАН України <https://orcid.org/0000-0001-7253-0404>

Іваненко Олена Іванівна, доктор технічних наук, виконувач обов'язків декана факультету автоматизації, промислової інженерії та екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0000-0001-6838-5400>

Карвацький Антон Янович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0000-0003-2421-4700>

Ковалюк Дмитро Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0000-0002-9729-1443>

Коріненко Богдан Валерійович, доктор філософії, молодший науковий співробітник відділу органічного та нафтохімічного синтезу Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії ім. В. П. Кухаря НАН України <https://orcid.org/0009-0001-7581-5656>

Крисенко Тамара Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; <https://orcid.org/0000-0002-9903-6884>

Куницький Дмитро Вадимович, аспірант відділу зварювання пластмас Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України <https://orcid.org/0009-0002-3488-6754>

Леготіна Ольга Олександрівна, магістрант кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лендел Тарас Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних систем та технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України <https://orcid.org/0000-0002-6356-1230>

Лисенко Віталій Пилипович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних систем та технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України <https://orcid.org/0000-0002-5659-6806>

Мартинюк Артем Сергійович, магістрант навчально-наукового фізико-технічного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0009-0001-0822-2092>

Мікульонок Ігор Олегович, доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; провідний інженер науково-організаційного відділу Інституту газу НАН України <https://orcid.org/0000-0001-8268-7229>

Наконечна Катерина Віталіївна, кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри економічної кібернетики Національного університету біоресурсів і природокористування України <https://orcid.org/0000-0002-1537-7201>

Неймаш Володимир Борисович, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторії радіаційних технологій Інституту фізики НАН України <https://orcid.org/0000-0002-2876-549X>

Овсянкіна Вікторія Олексіївна, кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0000-0002-2888-7948>

Павлов Сергій Григорович, аспірант кафедри інформаційних систем та технологій Національного університету біоресурсів і природокористування України <https://orcid.org/0009-0001-3343-5508>

Радовенчик Вячеслав Михайлович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0000-0001-5361-5808>

Радовенчик Ярослав Вячеславович, доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0000-0002-0101-0273>

Рибальченко Наталія Павлівна, кандидат біологічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу антибіотиків Інституту мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України <https://orcid.org/0000-0002-0505-3406>

Ситник Ілля Олегович, бакалавр, технік 1-ї категорії відділу зварювання пластмас Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України <https://orcid.org/0009-0002-6360-2669>

Тетерятников Гліб Вячеславович, аспірант факультету автоматизації, промислової інженерії та екології Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» <https://orcid.org/0009-0001-7581-5656>

Шаблій Тетяна Олександрівна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», <https://orcid.org/0000-0003-3454-675X>

Янковський Ілля Олексійович, магістрант кафедри хімічного, полімерного та силікатного виробництва Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»