

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

МАГНІТНА АКТИВАЦІЯ ПРОЦЕСУ ІОННОГО ОБМІНУ ПРИ ДЕМІНЕРАЛІЗАЦІЇ ПРИРОДНИХ ВОД

Д. Є. Ковтун¹, С. С. Душкін²¹Національний університет цивільного захисту України, Черкаси, Україна²Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

УДК 628.16:54.057

DOI: 10.52363/2522-1892.2024.2.8

Отримано: 2 листопада 2024

Прийнято: 28 листопада 2024

Cite as: Kovtun D., Dushkin S. (2024). Magnetic activation of ion exchange process during demineralisation of natural waters. Technogenic and ecological safety, 16(2/2024), 54–60. doi: 10.52363/2522-1892.2024.2.8

Анотація

Процес демінералізації природних вод полягає у видаленні з неї іонів важких металів та інших забруднюючих речовин. Враховуючи сучасні екологічні тенденції, зокрема погіршення стану довкілля та забруднення водних ресурсів, виникає потреба у підвищенні ефективності методів водоочищення, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище. Реагентні методи демінералізації широко застосовуються у системах водопідготовки, проте вони часто супроводжуються високими економічними і ресурсними витратами, а також додатковим забрудненням. Перспективним напрямком є комбіноване застосування реагентної обробки з іншими методами демінералізації, зокрема методом іонного обміну, який активно розвивається останніми роками. Цей метод ґрунтується на стехіометричному обміні іонами між іонообмінними матеріалами та водою.

У статті розглянуто питання магнітної активації процесу іонного обміну при демінералізації природних вод. Проведено аналіз існуючих систем водопідготовки з використанням методу іонного обміну та визначено параметри, які потребують удосконалення. Запропоновано математичну модель для оцінки ефективності магнітної активації катіоніту КУ-2х8. Аналіз підтверджує актуальність досліджень у сфері інтенсифікації іонообмінних процесів для покращення екологічної безпеки та ефективності демінералізації води. Результати демонструють вплив таких параметрів, як початкова жорсткість води та інтенсивність магнітного поля, на повну обмінну ємність катіоніту.

Ключові слова: демінералізація води, іонний обмін, магнітна активація, катіоніт, водопідготовка.

Постановка проблеми

Сучасні екологічні виклики, зокрема зростаюче забруднення водних ресурсів, вимагають пошуку нових підходів до очищення води. Існуючі реагентні методи демінералізації, хоча й широко застосовуються у системах водопідготовки, мають низку недоліків, таких як значні економічні та ресурсні витрати, а також спричинення вторинного забруднення. Це створює необхідність у вдосконаленні наявних технологій водоочищення з метою зниження їх впливу на довкілля.

На сьогодні спостерігається глобальна тенденція до зменшення запасів чистої води, яка є особливо гострою як в Україні, так і в інших частинах світу. Дослідження показують, що рівень забруднення підземних і поверхневих вод на території України є високим. Основними забруднювачами є іони заліза, марганцю, а також розчинені солі, включно з іонами кальцію та магнію [1]. Це створює серйозну загрозу для здоров'я населення та екологічної рівноваги. У зв'язку з цим розробка та вдосконалення методів демінералізації природних вод у системах водопідготовки є актуальним і важливим напрямком вирішення проблеми забезпечення чистою водою.

Одним із перспективних напрямів є використання методу іонного обміну, який завдяки своїй ефективності та потенціалу для поєднання з іншими технологіями, привертає увагу науковців. Однак, існуючі системи іонообмінної водопідготовки потребують удосконалення для підвищення їх ефективності та зниження витрат. Вивчення можливостей магнітної активації іонообмінних процесів

представляється перспективним напрямом для підвищення ефективності демінералізації води та поліпшення екологічних показників технологій водоочищення [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблематика демінералізації води та очищення природних вод від шкідливих домішок активно вивчається в науковій спільноті протягом останніх десятиліть. Зокрема, дослідження у сфері іонного обміну підтверджують його ефективність у видаленні іонів важких металів, сполук азоту, заліза, марганцю та солей жорсткості (кальцію і магнію).

Останні дослідження підтверджують, що основними факторами, які впливають на ефективність цього процесу, є рН середовища та хімічна природа функціональних груп. Зокрема, при вищих значеннях рН (у лужних умовах) відбувається депротонування функціональних груп, що підвищує їх здатність до зв'язування іонів важких металів [3]. Крім цього, дослідження підтверджують, що при зниженні рН функціональні групи смол протонуються, що знижує їх спорідненість до важких металів, але збільшує здатність до зв'язування катіонів слабкої кислоти. Це явище є критичним для розуміння механізму іонного обміну та дозволяє адаптувати процес до різних типів забруднювачів.

Існують підходи модифікації процесу іонного обміну, які полягають у комбінуванні іонообмінних матеріалів або технологій. Подібні підходи дозволяють очистити води від кількох іонів важких металів одночасно. Наприклад, у дослідженні [4]

було отримано модифіковану катіонообмінну смолу. Синтез відбувався окисленням продукту взаємодії полівінілхлориду з водним розчином полісульфіду кальцію. Результати експериментів свідчать, що отриманий іонообмінний матеріал ефективно очищає річкову воду від Ca^{2+} і Mg^{2+} іонів.

В дослідженнях також повідомляється про модифіковані іонообмінні матеріали на основі кератину. Як зазначається, хімічна модифікація дає можливість видалення іонів важких металів (міди та свинцю) з водних розчинів при рН (6,5...7). Це є перспективним для підвищення екологізації процесу іонного обміну [5, 6].

У сучасних роботах також підкреслюється, що магнітна активація іонного обміну може впливати на структуру іонізованих груп і тим самим підвищувати ефективність очищення води від важких металів. Важливим напрямом є оптимізація цих процесів, що включає регулювання рН і використання магнітного поля для інтенсифікації обмінних реакцій.

Дослідження показують перспективи удосконалення технологій водопідготовки на основі іонного обміну, особливо в умовах високого рівня забруднення підземних і поверхневих вод. Основний вплив магнітної активації полягає у прискореній адсорбції, зміні розчинності солей, гідратації іонів, зміні рН та швидкості протікання хімічних реакцій. Визначають приблизні оптимальні значення інтенсивності магнітного поля при магнітній обробці. Як зазначається в дослідженнях, доцільним є використання комплексної системи інтенсифікації іонообмінного процесу шляхом магнітної обробки. Вона включає в себе вплив на іонообмінні матеріали та воду, яка підлягає обробці. Зазначається, що оброблені магнітним полем іонообмінні смоли мають кращу сорбцію іонів важких металів. Також в подальшому регенерація іонообмінних смол буде супроводжуватись обробкою магнітним полем, що дає змогу знизити використання реагентів. Експериментально продемонстровано зміну концентрації іонів у складі оброблюваної води [7–9].

Механізм дії обробки води магнітним полем полягає у впливі на розчинені катіони металів. При стимуляції утворення центрів кристалізації змінюється швидкість електрохімічної коагуляції, що сприяє підвищенню повної обмінної ємності іонів. Дослідження демонструють ефективне осадження кальциту, що сприяє зменшенню забруднення працюючих поверхонь. Подібна методика знайшла застосування при попередній обробці води, що зменшує вплив на іонообмінні матеріали. Якщо розчини коагулянту сульфату алюмінію попередньо обробити магнітним полем, можливо досягти підвищення продуктивності фільтрів до 40 %, а також знизити вплив надлишкового алюмінію [10–13].

Як відомо, іони важких металів, наприклад Cu^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} , мають дипольний момент та парамагнітні властивості. Здатність притягуватись до зовнішнього магнітного поля завдяки наявності неспарених електронів є ключовим аспектом

теоретичного обґрунтування впливу магнітного поля на процес іонного обміну.

У роботі [14] досліджується вплив магнітного поля на видалення іонів Cu^{2+} , Ni^{2+} запропонованим адсорбуючим матеріалом з риб'ячої луски. Враховуючи, що в гідроксильних групах риб'ячої луски та у зазначених іонів присутній дипольний момент, передбачається підвищення їх сорбції. Як зазначається, вплив магнітного поля збільшив ефективність видалення іонів на 26 %.

Методика та матеріали

Для інтенсифікації іонообмінних процесів запропоновано спосіб із використанням модифікованих іонообмінників, що включає одночасну дію магнітного поля на іонообмінник та воду, яка очищується [15].

Використання запропонованого способу дозволяє подолати недолік методу магнітної обробки, який полягає в неможливості його застосування при великих значеннях жорсткості води [16].

Авторами пропонується математична модель, яка буде враховувати наступні фактори: жорсткість води, напруженість магнітного поля та робоча обмінна ємність катіоніту. Було проаналізовано стан водних об'єктів України, а також джерела забруднення навколишнього середовища, які пов'язані зі збройною агресією РФ проти України. За результатами було визначено середній вміст мінералізації води [17–20].

Для проведення досліджень була підготовлена модельна вода з жорсткістю 5 та 25 мг-екв/л, що відповідає м'якій та жорсткій воді. Напруженість магнітного поля обрано у діапазоні від 0 до 700 А/м. Проведено шість експериментів, під час яких змінювалися значення жорсткості води та напруженості магнітного поля. Експериментальні дані для кожного з досліджених параметрів наведені в таблиці 1, де всі отримані значення були приведені до середніх показників для подальшого аналізу. Під час кожного експерименту вимірювалась робоча обмінна ємність іоніту.

Таблиця 1 – Експериментальні дані для жорсткості води 25 та 5 мг-екв/л

Жорсткість води, мг-екв/л	Напруженість магнітного поля Н, А/м	Робоча обмінна ємність ($E_{\text{роб}}$), г-екв/м ³	Зміна $E_{\text{роб}}$, %
5	0	830	–
	100	979	+14,2
	300	1085	+22,5
	500	1010	+16,1
	700	920	+8,9
25	0	775	–
	100	885	+ 14,2
	300	950	+22,5
	500	899	+16,1
	700	844	+8,9

Обрано поліноміальну функцію, яка має наступний вигляд:

$$Y(X_1, X_2). \quad (1)$$

Вибір поліноміальної функції обґрунтовується її гнучкістю, що дає змогу враховувати всі елементи системи, їх взаємодію та вплив. Використання запропонованої математичної моделі дає змогу комплексно оцінити вплив магнітної активації іоніта на показники, що досліджуються, а також врахувати зміну інших параметрів системи. Отримані результати будуть демонструвати зміну фіксованих значень при зміні значень магнітної активації, а також зміну інших параметрів.

Виклад основного матеріалу

Для оцінки впливу магнітної активації та жорсткості води на робочу обмінну ємність катіоніту було запропоновано поліноміальну функцію, що дозволяє гнучко моделювати взаємодію елементів системи. Функція враховує параметри жорсткості води (X_1) та напруженість магнітного поля (X_2), а також їхній вплив на робочу обмінну ємність (Y). Таке рівняння дозволяє комплексно оцінити результати експериментів, оскільки воно враховує взаємодію цих параметрів і їхній сумарний вплив на кінцеві показники.

Математична модель поліноміальної функції, яка використовується для опису процесу наведено в рівнянні 2:

$$Y(X_1, X_2) = F_1 \cdot X_1 \cdot X_2^2 + F_2 \cdot X_1 \cdot X_2 + F_3 \cdot X_1^2 + F_4 \cdot X_1 + F_5 \cdot X_2 + F_6 \quad (2)$$

де $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ – коефіцієнти, розв'язки системи рівнянь, знайдені за допомогою методу Гауса;

X_1 – жорсткість води;

X_2 – напруженість магнітного поля;

Y – робоча обмінна ємність;

Основою для побудови математичної моделі стало рівняння (2). Для визначення коефіцієнтів $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$, було використано метод Гауса. Він передбачає приведення системи рівнянь, що описує результати експериментів, до верхньотрикутного вигляду з подальшим знаходженням коефіцієнтів розв'язку. Попередньо для розрахунків прийнято $\bar{X}_2 = X_2/100$.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 1 & 830 \\ 5 & 5 & 1 & 5 & 1 & 1 & 979 \\ 45 & 15 & 9 & 5 & 3 & 1 & 1085 \\ 0 & 0 & 0 & 25 & 0 & 1 & 775 \\ 25 & 25 & 1 & 25 & 1 & 1 & 885 \\ 225 & 75 & 9 & 25 & 3 & 1 & 950 \end{pmatrix}$$

Враховуючи аналіз експериментальних даних (табл. 1), обрано значення для побудови математичної моделі, що відповідають напруженості магнітного поля в діапазоні від 0 до

300 А/м. Це аргументується найбільшими значеннями зміни робочої обмінної ємності катіоніту.

Результати розрахунку коефіцієнта F :

$$\begin{aligned} F_1 &= 0,308333333 \cdot 10; \\ F_2 &= -0,225833333 \cdot 10^1; \\ F_3 &= -0,335416667 \cdot 10^1; \\ F_4 &= -0,275000000 \cdot 10^1; \\ F_5 &= 0,192291667 \cdot 10^3; \\ F_6 &= 0,843750000 \cdot 10^3. \end{aligned}$$

Наступним кроком підставимо значення $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6$ у рівняння:

$$\begin{aligned} Y(X_1, X_2) &= 0,308333333 \cdot 10 \cdot X_1 \cdot X_2^2 - \\ &- 0,225833333 \cdot 10^1 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ &- 0,335416667 \cdot 10^1 \cdot X_1^2 - \\ &- 0,275000000 \cdot 10^1 \cdot X_1 + \\ &+ 0,192291667 \cdot 10^3 \cdot X_2 + 0,843750000 \cdot 10^3. \end{aligned}$$

Отримані результати занесено до таблиці 2.

Таблиця 2 – Дані робочої обмінної ємності катіоніта, отримані за результатами розрахунків

$X_2/100$	$X_1 = 5$	$X_1 = 25$
	Y	Y
0,0	830	775
0,5	913	836
1,0	975	885
1,5	1030	921
2,0	1064	943
2,5	1082	953
3,0	1085	949
3,5	1071	934
4,0	1042	905

З отриманих результатів бачимо підвищення робочої обмінної ємності при магнітній обробці при значеннях напруженості магнітного поля до 300 А/м.

Графік, наведений на рисунку 1, створений на основі отриманих розрахункових результатів за формулою 2, візуалізує зміну робочої обмінної ємності катіоніта під впливом різних значень напруженості магнітного поля при фіксованих значеннях жорсткості води. На рисунку 2 відображено зміну робочої обмінної ємності катіоніта при різних рівнях жорсткості води та фіксованій напруженості магнітного поля.

Графіки $Y(5, X_2)$ та $Y(25, X_2)$ показують, як змінюються результати при фіксованих значеннях $X_1 = 5$ та $X_1 = 25$ при зміні параметра X_2 , який відповідає рівню магнітної активації. Тобто показано зміну робочої обмінної ємності в залежності від фіксованих значень жорсткості води та змінних значень напруженості магнітного поля.

Визначимо оптимальні значення жорсткості води, при яких ефективність робочої обмінної ємності катіоніту буде найвищою, при значеннях напруженості магнітного поля X_2 від 100 до 300 А/м. Підставивши в формулу 2 визначені необхідні значення, отримуємо результати, які внесено до таблиці 3.

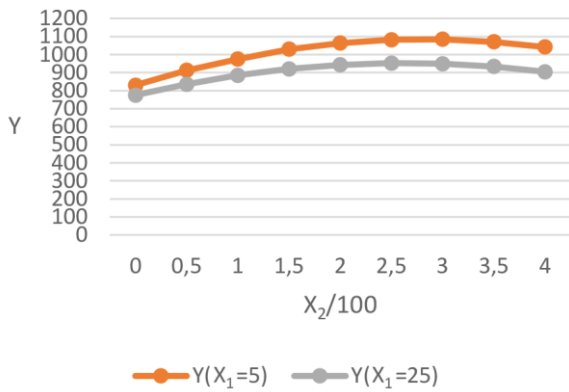


Рисунок 1 – Зміна робочої обмінної ємності при зміні напруженості магнітного поля і фіксованих значеннях жорсткості води

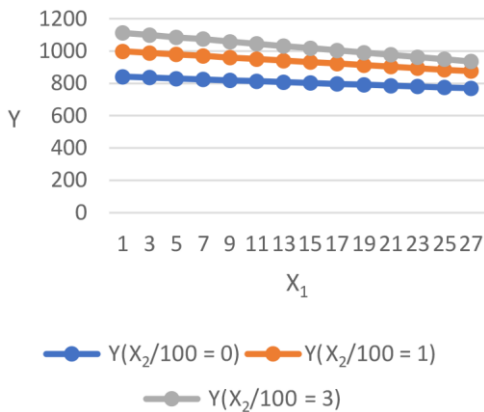


Рисунок 2 – Залежність робочої обмінної ємності при зміні значень жорсткості води та фіксованих значеннях напруженості магнітного поля

Графіки $Y(X_1, 0)$ та $Y(X_1, 3)$ показують, як змінюються результати при різних рівнях X_1 (жорсткість води) і фіксованих значеннях $X_2 = 0, \bar{X}_2 = 1, \bar{X}_2 = 3$ (напруженості магнітного поля).

Таблиця 3 – Зміна значень робочої обмінної ємності катіоніту зі зміною значень X_1 при фіксованих значеннях X_2

X_1	$\bar{X}_2 = 0$	$\bar{X}_2 = 1$	$\bar{X}_2 = 3$
	Y	Y	Y
1	841	998	1112
3	836	988	1099
5	830	979	1085
7	825	970	1075
9	819	960	1058
11	814	951	1045
13	808	941	1031
15	803	932	1018
17	797	923	1004
19	792	913	990
21	786	904	977
23	781	894	963
25	775	884	950
27	770	876	936

Для визначення оптимальних значень жорсткості води, які необхідні для ефективної дії магнітної обробки, використаємо залежність:

$$F(Y, X_2). \tag{3}$$

Вказана залежність була отримана з математичної моделі, яка описана формулою (2). Після необхідних перетворень, має наступний вигляд:

$$F(Y, X_2) = Y - F_3 \cdot X_2^2 - F_5 \cdot X_2 - (F_6/F_1) \cdot X_2^2 + F_2 \cdot X_2 + F_4. \tag{4}$$

Підставивши необхідні значення, занесемо розрахунки у таблицю 4.

Таблиця 4 – Розрахунки функції визначення оптимальних значень жорсткості води

X_2	$F(Y_1, X_2)$	$F(Y_2, X_2)$	$F(Y_3, X_2)$	$F(Y_4, X_2)$	$F(Y_5, X_2)$	$F(Y_6, X_2)$	$F(Y_7, X_2)$
0	15,90	-2,27	-2,04	-38,63	-56,81	-75,00	-93,18
0,25	27,22	12,05	-3,11	-18,28	-33,46	-48,63	-63,80
0,50	34,58	21,43	8,28	-4,86	-18,01	-31,16	-44,31
0,75	39,59	27,89	16,18	4,47	-7,23	-18,94	-30,65
1,00	43,08	32,44	21,80	11,17	0,53	-10,10	-20,74
1,25	45,51	35,68	25,86	16,04	6,22	-3,59	-13,41
1,50	47,15	37,97	28,78	19,60	10,41	1,23	-7,95
1,75	48,20	39,51	30,83	22,15	13,46	4,78	-3,90
2,00	48,75	40,46	32,18	23,89	15,60	7,32	-0,96
2,25	48,89	40,92	32,95	24,97	17,00	9,02	1,05
2,50	48,66	40,94	33,21	25,484	17,75	10,02	2,29
2,75	48,10	40,56	33,02	25,480	17,93	10,39	2,85
3,00	47,22	39,81	32,40	25,00	17,59	10,18	2,77
3,25	46,01	38,69	31,38	24,06	16,74	9,42	2,10
3,50	44,47	37,20	29,93	22,66	15,39	8,12	0,85
3,75	42,59	35,32	28,06	20,79	13,53	6,27	-0,99
4,00	40,32	33,02	25,72	18,43	11,13	3,83	-3,44

Результати та обговорення

Запропоновано математичну модель, на основі поліноміальної функції, для дослідження ефективності магнітної активації процесу іонного обміну.

Аналіз результатів свідчить про те, що магнітна обробка води перед іонообмінним процесом може суттєво впливати на ефективність катіоніту. Збільшення напруженості магнітного поля призводить до зростання робочої ємності, що вказує на зміну структури води та покращення умов для взаємодії іонів з активними центрами сорбенту. Однак, жорсткість води також відіграє важливу роль. Збільшення жорсткості, тобто вмісту кальцію та магнію, знижує ефективність іонного обміну через конкуренцію цих іонів з іонами, що обмінюються.

Отримані результати мають значний практичний потенціал. Розроблена модель дозволяє оптимізувати процес водопідготовки, підбираючи оптимальні умови магнітної обробки для різних типів води та катіонітів. Це може призвести до зниження витрат на реагенти та енергію, а також до поліпшення якості очищеної води. Крім того, отримані дані можуть бути використані для розробки нових технологій водопідготовки, що поєднують традиційні методи іонообміну з магнітною активацією.

Висновки

1. Проведені експерименти та побудована математична модель показують, що напруженість магнітного поля впливає на робочу обмінну ємність катіоніту, особливо в діапазоні від 0 до 300 А/м. Найбільше підвищення обмінної ємності спостерігається при напруженості магнітного поля до 300 А/м, після чого ефективність знижується.

2. Запропонована поліноміальна модель адекватно описує вплив жорсткості води та напруженості магнітного поля на робочу обмінну ємність. Вона дозволяє точно передбачати поведінку системи при зміні цих параметрів і дає можливість комплексно оцінити їхній вплив, що робить модель придатною для практичного застосування у водопідготовці.

3. Запропоновано функцію для визначення оптимальних значень жорсткості води, на основі математичної моделі, для ефективності використання магнітної активації процесу іонного обміну.

4. Встановлено, що магнітна активація найбільш ефективна при напруженості магнітного поля до 300 А/м. Вибір оптимальних параметрів магнітної активації та жорсткості води дозволяє підвищити робочу обмінну ємність катіоніту, що сприяє більш ефективному процесу водопідготовки.

5. Використання магнітної активації у водопідготовці може бути рекомендовано для оптимізації процесів демінералізації природних вод, що дозволить підвищити ефективність обміну іонів і, як результат, покращити якість очищення води.

Слід зазначити, що використання магнітної активації для інтенсифікації процесів іонного обміну в системах водопідготовки потребує проведення додаткових досліджень. Необхідно детальніше вивчити механізми взаємодії магнітного поля з катіонітом, а також встановити оптимальні параметри для різних умов експлуатації, щоб забезпечити максимальну ефективність цього методу.

В подальшому планується поглиблене дослідження оптимальних значень жорсткості води, підходів до її регуляції, а також розширення досліджень впливу магнітної обробки на аніоніти.

ЛІТЕРАТУРА

1. Аналіз та екологічна оцінка результатів моніторингу природних питних вод у малих громадах України: Звіт про науково-дослідну роботу / М. Л. Сорока та ін. Київ, 2022. 73 с. DOI: 10.13140/RG.2.2.11787.67360.
2. Removal of hexavalent chromium from electroplating wastewater by ion-exchange in presence of Ni(II) and Zn(II) ions / P. Thiripelu et al. *Journal of Water Process Engineering*. 2024. Vol. 58. Art. 104815. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.104815.
3. Jasim A. Q., Ajjam S. K. Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater Using Ion Exchange Resin in a Batch Process with Kinetic Isotherms. *South African Journal of Chemical Engineering*. 2024. Vol. 49. P. 43–54. DOI: 10.1016/j.sajce.2024.04.002.
4. Removal of Ca(II) and Mg(II) ions from solutions to sulfonic cation exchanger based on plasticized polyvinylchloride / D. Bekchanov, M. Mukhamediev, M. Juraev, R. Alosmanov. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*. 2024. Vol. 199(3). P. 201–209. DOI: 10.1080/10426507.2024.2315530.
5. Almoukayed A. A., Barhoum R. Chemical modification of keratin using Schiff bases to prepare cation exchangers and study their adsorption activity. *Heliyon*. 2023. Vol. 9(5). Art. e15567. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15567.
6. Valorization of keratin biofibers for removing heavy metals from aqueous solutions / H. Zhang, F. Carrillo, M. López-Mesas, C. Palet. *Textile Research Journal*. 2018. Vol. 89(7). P. 1153–1165. DOI: 10.1177/0040517518764008.
7. Ковтун Д., Душкін С. (2024). Магнітна модифікація іонообмінних процесів. *Техногенно-екологічна безпека*. 2024. № 15(1/2024). С. 75–79. DOI: 10.52363/2522-1892.2024.1.8.
8. Савченко В. В., Синявський О. Ю., Бунько В. Я. (2019). Вплив магнітного поля на воду. *Енергетика і автоматика*. 2019. № 2019(1). С. 6–15. DOI: 10.31548/energiya2019.01.006.
9. Jawad S. I., Karkush M., & Kaliakin V. N. Alteration of physicochemical properties of tap water passing through different intensities of magnetic field. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*. 2023. Vol. 32(1). DOI: 10.1515/jmbm-2022-0246.
10. Божедай П., Тютко С. М. Сучасні методи обробки води. *Статті та тези – Фаховий коледж*. Фаховий коледж Національного фармацевтичного університету, 2021. URL: <https://college.nuph.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/%D0%91%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%B9-%D0%A2%D1%8E%D1%82%D1%8C%D0%BA%D0%BE.pdf> (дата звернення: 12.10.2024).
11. Dushkin S., Shevchenko T. Applying a modified aluminium sulfate solution in the processes of drinking water preparation. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 4 (10-106). P. 26-36. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210096.
12. Mascolo M. C. Effect of magnetic field on calcium carbonate precipitated in natural waters with prevalent temporary hardness. *Journal of Water Process Engineering*. 2021. Vol. 41. Art. 102087. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102087.

13. Using fish scales as a new biosorbent for adsorption of nickel and copper ions from wastewater and investigating the effects of electric and magnetic fields on the adsorption process / S. M. J. Sajjadi Shourije et al. *Chemosphere*. 2023. Vol. 322. Art. 137829. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137829
14. Ahmaruzzaman M. Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011. Vol. 166(1-2). P. 36–59. DOI: 10.1016/j.cis.2011.04.005.
15. Dushkin S. Study of the process of activation of aluminum sulfate coagulant solutions during filtration on rapid filters. *International Journal of Chemistry, Mathematics and Physics*. 2023. Vol. 7(6). P. 01–06. DOI: 10.22161/ijcmp.7.6.1.
16. Душкін С. С., Ковтун Д. Є. Інтенсифікація процесів іонного обміну в системах водопідготовки. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2024. № 46. P. 4–13. DOI: 10.32347/2524-0021.2024.46.4-13.
17. Contaminants, mutagenicity and toxicity in the surface waters of Kyiv, Ukraine / K. T. Ho et al. *Marine Pollution Bulletin*. 2020. Vol. 155. Art. 111153. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111153.
18. Environment and health hazards due to military metal pollution: A review / S. Shukla et al. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2023. Art. 100857. DOI: 10.1016/j.enmm.2023.100857.
19. The influence of climate changes on heavy metals accumulation in *Alosa immaculata* from the Danube River Basin / N.-N. Lazăr et al. *Marine Pollution Bulletin*. 2024. Vol. 200. Art. 116145. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116145.
20. Assessment of heavy metals and radionuclides in groundwater and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh / T. R. Choudhury et al. *Journal of Contaminant Hydrology*. 2022. Vol. 251. Art. 104072. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2022.104072.

Kovtun D., Dushkin S.

MAGNETIC ACTIVATION OF ION EXCHANGE PROCESS DURING DEMINERALISATION OF NATURAL WATERS

The process of demineralizing natural water involves removing heavy metal ions and other pollutants from it. Given the current environmental trends, including environmental degradation and water pollution, there is a need to improve the efficiency of water treatment methods while minimizing the environmental impact. Reagent demineralization methods are widely used in water treatment systems, but they are often accompanied by high economic and resource costs, as well as additional pollution. A promising area is the combined use of reagent treatment with other demineralization methods, in particular the ion exchange method, which has been actively developing in recent years. This method is based on the stoichiometric exchange of ions between ion exchange materials and water.

The article deals with the issue of magnetic activation of the ion exchange process in the demineralization of natural waters. The analysis of existing water treatment systems using the method of ion exchange is carried out and the parameters that need to be improved are determined. A mathematical model for evaluating the efficiency of magnetic activation of cationite KU-2x8 is proposed. The analysis confirms the relevance of research in the field of intensification of ion exchange processes to improve environmental safety and efficiency of water demineralization. The results demonstrate the influence of such parameters as the initial water hardness and magnetic field intensity on the total exchange capacity of the cationite.

Key words: water demineralization, ion exchange, magnetic activation, cationite, water treatment.

REFERENCES

1. Soroka, M., Baiiliuk, Y., Daniliuk, A., Zelenko, Y., & Tarasova, L. (2022). *Analiz ta ekolohichna otsinka rezultativ monitorynhu pryrodnykh pytnykh vod u malykh hromadakh Ukrainy: Zvit pro naukovo-doslidnu robotu [Analysis and ecological assessment of the results of monitoring natural drinking water in small communities of Ukraine]*. DOI: 10.13140/RG.2.2.11787.67360. [in Ukrainian]
2. Thiripelu, P., Manjunathan, J., Revathi, M., & Ramasamy, P. (2024). Removal of hexavalent chromium from electroplating wastewater by ion-exchange in presence of Ni(II) and Zn(II) ions. *Journal of Water Process Engineering*, 58, 104815. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.104815.
3. Jasim, A. Q., & Ajjam, S. K. (2024). Removal of heavy metal ions from wastewater using ion exchange resin in a batch process with kinetic isotherms. *South African Journal of Chemical Engineering*. DOI: 10.1016/j.sajce.2024.04.002.
4. Bekchanov, D., Mukhamediev, M., Juraev, M., & Alosmanov, R. (2024). Removal of Ca(II) and Mg(II) ions from solutions to sulfonic cation exchanger based on plasticized polyvinylchloride. *Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements*, 199(3), 201–209. DOI: 10.1080/10426507.2024.2315530.
5. Almoukayed, A. A., & Barhoum, R. (2023). Chemical modification of keratin using Schiff bases to prepare cation exchangers and study their adsorption activity. *Heliyon*, 9(5), e15567. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15567.
6. Zhang, H., Carrillo, F., López-Mesas, M., & Palet, C. (2018). Valorization of keratin biofibers for removing heavy metals from aqueous solutions. *Textile Research Journal*, 89(7), 1153–1165. DOI: 10.1177/0040517518764008.
7. Kovtun, D., & Dushkin, S. (2024). Mahnitna modyfikatsiia ionoobminnykh protsesiv [Magnetic modification of ion exchange processes]. *Technogenic and Ecological Safety*, 15(1/2024), 75–79. DOI: 10.52363/2522-1892.2024.1.8. [in Ukrainian]
8. Savchenko, V., Sinyavsky, O., & Bunko, V. (2019). Vplyv mahnitnoho polia na vodu [Influence of magnetic field on water]. *Energy and Automation*, 2019(1), 6–15. DOI: 10.31548/energiya2019.01.006. [in Ukrainian]
9. Jawad, S. I., Karkush, M., & Kaliakin, V. N. (2023). Alteration of physicochemical properties of tap water passing through different intensities of magnetic field. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32(1). DOI: 10.1515/jmbm-2022-0246.
10. Bozhedai, P., & Tyutko, S. M. (2021). Suchasni metody obrobky vody [Modern methods of water treatment]. *Statti ta tezy – Fakhovy College*. Fakhovy College of National Pharmaceutical University. <https://college.nuph.edu.ua/wp-content/uploads/2021/04/%D0%91%D0%BE%D0%B6%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%B9-%D0%A2%D1%8E%D1%82%D1%8C%D0%BA%D0%BE.pdf>. [in Ukrainian]
11. Dushkin, S., & Shevchenko, T. (2020). Applying a modified aluminium sulfate solution in the processes of drinking water preparation. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10-106), 26–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210096.
12. Mascolo, M. C. (2021). Effect of magnetic field on calcium carbonate precipitated in natural waters with prevalent temporary hardness. *Journal of Water Process Engineering*, 41, 102087. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102087.
13. Sajjadi Shourije, S. M. J., Dehghan, P., Bahrololoom, M. E., Cobley, A. J., Vitry, V., Azar, G. T. P., Kamyab, H., & Mesbah, M. (2023). Using fish scales as a new biosorbent for adsorption of nickel and copper ions from wastewater and investigating the effects of electric and magnetic fields on the adsorption process. *Chemosphere*, 322, 137829. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.137829.
14. Ahmaruzzaman, M. (2011). Industrial wastes as low-cost potential adsorbents for the treatment of wastewater laden with heavy metals. *Advances in Colloid and Interface Science*, 166(1-2), 36-59. DOI: 10.1016/j.cis.2011.04.005.
15. Dushkin, S. (2023). Study of the process of activation of aluminum sulfate coagulant solutions during filtration on rapid filters. *International Journal of Chemistry, Mathematics and Physics*, 7(6), 01–06. DOI: 10.22161/ijcmp.7.6.1.

16. Dushkin, S., & Kovtun, D. (2024). Intensyfikatsiia protsesiv ionnoho obminu v systemakh vodopidhotovky [Intensification of ion exchange processes in water supply systems]. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, 46, 4–13. DOI: 10.32347/2524-0021.2024.46.4-13. [in Ukrainian]
17. Ho, K. T., Konovets, I. M., Terletskaya, A. V., Milyukin, M. V., Lyashenko, A. V., Shitikova, L. I., Shevchuk, L. I., Afanasyev, S. A., Krot, Y. G., Zorina-Sakharova, K. Ye., Goncharuk, V. V., Skrynnyk, M. M., Cashman, M. A., & Burgess, R. M. (2020). Contaminants, mutagenicity and toxicity in the surface waters of Kyiv, Ukraine. *Marine Pollution Bulletin*, 155, 111153. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2020.111153.
18. Shukla, S., Mbingwa, G., Khanna, S., Dalal, J., Sankhyan, D., Malik, A., & Badhwar, N. (2023). Environment and health hazards due to military metal pollution: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 100857. DOI: 10.1016/j.enmm.2023.100857.
19. Lazăr, N.-N., Simionov, I.-A., Petrea, Ș.-M., Iticescu, C., Georgescu, P.-L., Dima, F., & Antache, A. (2024). The influence of climate changes on heavy metals accumulation in *Alosa immaculata* from the Danube River Basin. *Marine Pollution Bulletin*, 200, 116145. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2024.116145.
20. Choudhury, T. R., Ferdous, J., Haque, Md. M., Rahman, Md. M., Quraishi, S. B., & Rahman, M. S. (2022). Assessment of heavy metals and radionuclides in groundwater and associated human health risk appraisal in the vicinity of Rooppur nuclear power plant, Bangladesh. *Journal of Contaminant Hydrology*, 251, 104072. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2022.104072.