

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ІОННОГО ОБМІНУ В СИСТЕМАХ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Станіслав Душкін¹, Давід Ковтун²

Національний університет цивільного захисту України,
94, Чернишевська вул., Харків, 61023, Україна
¹канд. техн. наук, d.akass@ukr.net, orcid.org/0000-0002-9345-9632
²davidkovtun15@gmail.com, orcid.org/0009-0001-8911-4148

DOI: 10.32347/2524-0021.2026.53.18-26

Анотація. У сучасних умовах особлива увага приділяється різним методам інтенсифікації процесів очищення природних та стічних вод, удосконаленню існуючих технологій очищення, а також впровадженню нових методів і технологічних прийомів, що дозволяють підвищити якість очищення стічних вод і зменшити антропогенний вплив на екосистему. Важливо враховувати не лише ефективність очищення, але й його екологічність та відповідність сучасним стандартам та вимогам до збереження навколишнього природного середовища. Такий підхід дозволяє забезпечити стійкість екосистем та збереження водних ресурсів для майбутніх поколінь.

У статті висвітлені питання пов'язані з використанням фізичних методів водопідготовки в системах водопостачання. Для інтенсифікації процесів іонного обміну в системах водопостачання запропоновано спосіб коригування мінерального складу природних і стічних вод з використанням модифікованих іонообмінників, який передбачає одночасну дію магнітного поля на іонообмінник і воду, що очищується. Використання магнітної модифікації іонообмінників дозволяє підвищити продуктивність споруд водопідготовки, в середньому на 25-30 %, з отриманням фільтрату необхідної якості, збільшити тривалість фільтроциклу, знизити витрати регенеративних розчинів, що свідчить про збільшення ефективності очищення води в наслідок застосування магнітної модифікації.

Встановлено збільшення динамічної об'ємної ємності іонообмінників на 15-20 %, що свідчить про покращення іонообмінної здатності за рахунок інтенсифікації процесів іонного обміну в системах водопостачання. Інтенсифікація процесів іонного обміну під час коригування мінерального складу природних і стічних вод за допомогою магнітного поля визначається такими основними факторами: впливом магнітного поля на структуру і властивості води, що фільтруються через іоніт та впливом магнітного поля на активність і рухливість іонів, що обмінюються, дифузійну і гідратацію їх, іонообмінну рівновагу та ін. фактори.

Ключові слова: іонний обмін, сольовий склад, модифікація іонообмінників, коефіцієнт дифузії, гідратовані іони, магнітна обробка води.

ВСТУП

Охорона навколишнього природного середовища одна із найважливіших проблем сучасності. Раціональне використання водних ресурсів, очищення природних та стічних вод набувають особливо актуального значення завдяки їх нерозривному зв'язку з охороною природних вод від забруднень [1]. Одним з методів раціонального використання природних водних ресурсів є

створення оборотних систем водопостачання підприємств.

Коригування сольового складу використаної технічної води за допомогою іонного обміну на Н- і ОН-фільтрах робить необхідною інтенсифікацію іонообмінних процесів, що дозволяє підвищити ефективність очищення води, знизити вплив на навколишнє середовище та забезпечити надійне водопостачання для споживачів [2, 3].

Серед методів і способів, які використовуються для інтенсифікації процесів водопідготовки, найбільш перспективними є методи, пов'язані з застосуванням раціональних, технологічно обґрунтованих схем, модифікацією існуючих та розробкою нових методів і конструкцій водоочисних апаратів [4, 5].

Модифікація іонообмінників дає змогу:

- збільшити робочу (динамічну) обмінну ємність іонообмінних матеріалів;
- підвищити продуктивність Н- і ОН- іонообмінних установок;
- збільшити тривалість фільтроциклу;
- знизити витрату регенераційних розчинів.

У цій роботі розглянута технологія модифікації іоннообмінника шляхом зміни технологічного процесу забезпечення покращення іонообмінних процесів та здешевлення їх.

МЕТА І МЕТОДИ

Метою досліджень викладених у статті є науково-технічне обґрунтування інтенсифікації процесів іонного обміну в системах водопостачання шляхом технічної модифікації іонообмінників.

На підставі проведених досліджень інтенсифікацію процесів іонного обміну в системах водопостачання можна пояснити такими факторами:

- впливом модифікованих іонообмінників на дифузійні процеси;
- якісними показниками технічної води;
- параметрами модифікації.

Для досягнення поставленої мети використовувалися наступні методи:

- експериментальні вимірювання – проведено серію експериментів з використанням модифікованих іонообмінників для аналізу їх впливу на дифузійні процеси в системах водопостачання;
- аналіз якісних показників технічної води – проведено комплексний аналіз якісних показників води, яка проходила через модифіковані іонообмінники, для оцінки ефективності їхньої роботи;
- визначення параметрів модифікації – проведено дослідження щодо параметрів

модифікації іонообмінників, таких як хімічний склад, структура поверхні та інші характеристики, що могли вплинути на їхню ефективність;

– статистичний аналіз результатів – отримані дані були піддані статистичному аналізу для визначення статистично значущих відмінностей у впливі модифікованих іонообмінників на процеси іонного обміну.

Використання цих методів дозволило отримати науково обґрунтовані результати щодо інтенсифікації процесів іонного обміну в системах водопостачання за допомогою технічної модифікації іонообмінників.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Аналіз існуючих методів інтенсифікації іоннообмінних процесів у системах водопідготовки [6-10] свідчить, що процес іонного обміну складається з декількох стадій:

- перенесення іонів з розчину до поверхні зерна іоніту за рахунок дифузії;
- переміщення іона, що звільнився в результаті обміну, до поверхні зерна;
- переміщення іона із зерна в розчин.

Коефіцієнт дифузії іонів залежить від рухливості іонів. Його значення збільшується зі зменшенням радіусів гідратованих іонів і зменшується при збільшенні зарядів іонів. Також коефіцієнт залежить від гідратації функціональних груп, їхньої кількості та ступеня іонізації, від інтенсивності взаємодії протиіонів з фіксованими групами та деяких інших чинників. На величину коефіцієнта дифузії впливають геометричні характеристики зерна [11, 12] і температура [13, 14].

Поліпшення умов фізико-хімічних процесів [15] іонного обміну можна поділити на такі групи:

- застосування раціональних технологічних прийомів;
- використання технологічно обґрунтованих схем;
- розробка нових конструкцій і модернізація наявних іонообмінних апаратів.

Під час проектування оборотних схем промислового водопостачання поширення набула багатоступенева регенерація іонообмінного матеріалу, що дає змогу економно

витрачати реагенти й утилізувати компоненти стічних вод.

Економічну витрату регенераційних розчинів можна отримати, застосовуючи протиточну регенерацію. Її суть полягає в промиванні катіонітового фільтра об'ємом кислоти, який незначимо більше або дорівнює еквівалентному об'єму. Однак такий спосіб не призводить до повного видалення сорбційних іонів, особливо з нижньої частини фільтрувального шару.

На якість фільтрату певний вплив чинить швидкість фільтрування, температура вихідної води, рН тощо: так, фільтрування води через катіоніти зі швидкостями, які відрізняються від оптимальних, помітно позначається на гідродинаміці фільтрування, внаслідок чого збільшується нерівномірність руху води в товщі іоніту, погіршується якість фільтрату внаслідок присмоктування води вздовж стінок фільтрів.

Температура води, що надходить на фільтри, також впливає на процеси протікання іонного обміну. У низці випадків погіршення процесів іонного обміну спостерігається внаслідок руйнування катіоніту в разі потрапляння лужної та підігрітої води з великим вмістом розчиненого кисню: відбувається зниження обмінної місткості через окиснення скелетних груп іонообмінного матеріалу, що має необоротний характер. Водночас застосування підігрітого регенераційного розчину дає змогу поліпшити фізико-хімічні умови регенерації іонообмінних матеріалів і знизити витрату реагентів-регенераторів. Дослідження [16, 17] показали, що під час регенерації катіоніту підігрітим до 70 °С розчином солі можна знизити залишкову лужність фільтрату до 0,2 замість 0,6 мг-екв/л під час регенерації катіоніту регенераційним розчином із температурою 18 °С.

Робоча обмінна здатність іонітів може зменшуватися так само з низки наступних причин: у разі прогресуючого забруднення іонітів зваженими речовинами й органічними колоїдами, через недостатнє освітлення води перед подачею її на іонообмінні фільтри, сорбції катіонітом іонів алюмінію та заліза в разі порушення режиму

коагуляції. Щоб уникнути прогресуючого забруднення катіоніту зваженими речовинами й органічними колоїдами, слід домагатися задовільного освітлення води на спорудах її попереднього очищення.

Позитивний вплив на збільшення обмінної ємності в деяких випадках чинить регенерація підвищеними дозами регенератора.

Поліпшення фізико-хімічних умов іонного обміну певною мірою може бути досягнуто з використанням іонообмінних фільтрів змішаної дії, а також протитечійного і ступінчасто-протитечійного аніонування.

Застосування схем Н-На-катіонування води має низку таких переваг [18]:

- усувається необхідність нейтралізації Н-катіонованої води шляхом регулювання кількості потоків води після Н- і На-катіонітових фільтрів;

- зменшується витрата кислоти;

- відсутнє утворення кислих стоків під час регенерації та необхідність їхньої нейтралізації, щоб уникнути корозії каналізаційної мережі;

- зменшується корозія внутрішніх елементів Н-катіонітових фільтрів.

Це зумовило широке їх (схем) поширення в практиці водопідготовки.

Аналізуючи вищесказане, можна стверджувати, що для інтенсифікації іонообмінних процесів під час коригування мінерального складу природних і стічних вод запропоновано метод модифікації іонообмінних смол за допомогою магнітного поля. Застосування цього методу дає змогу:

- поліпшити якість фільтрату, що має велике значення для підвищення надійності та довговічності роботи систем оборотного водопостачання:

- збільшити робочу (динамічну) обмінну ємність іонообмінних матеріалів;

- підвищити продуктивність Н- і ОН-іонообмінних установок, в середньому, на 25...30 %, з отриманням фільтрату необхідної якості;

- збільшити тривалість фільтроциклу;

- зменшити втрати часу на регенерацію іонообмінних матеріалів;

- знизити витрати води на власні потреби.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Для коригування мінерального складу природних і стічних вод набули поширення методи із застосуванням хімічних процесів, зокрема, метод іонного обміну, що має такі основні сфери застосування: отримання хімічно очищеної води, доочищення стічних вод при використанні їх у системах промводопостачання. При цьому технологічні прийоми, що використовуються для іонообмінного коригування води, визначаються вимогами виробничого процесу, в якому використовується деіонізована вода.

Основним недоліком методу магнітної обробки води перед подачею на іонообмінні

фільтри є неможливість його застосування під час мінерального коригування стічних вод зі значним вмістом сульфатів і хлоридів, необхідність створення досить високих напруженостей магнітного поля, нестабільність одержуваних результатів під час інтенсифікації іонообмінних процесів.

Для інтенсифікації іонообмінних процесів запропоновано спосіб із використанням модифікованих іонообмінників, що включає одночасну дію магнітного поля на іонообмінник та воду, яка очищується [19].

Дослідження проводили на лабораторній установці, схему якої наведено на рис. 1.

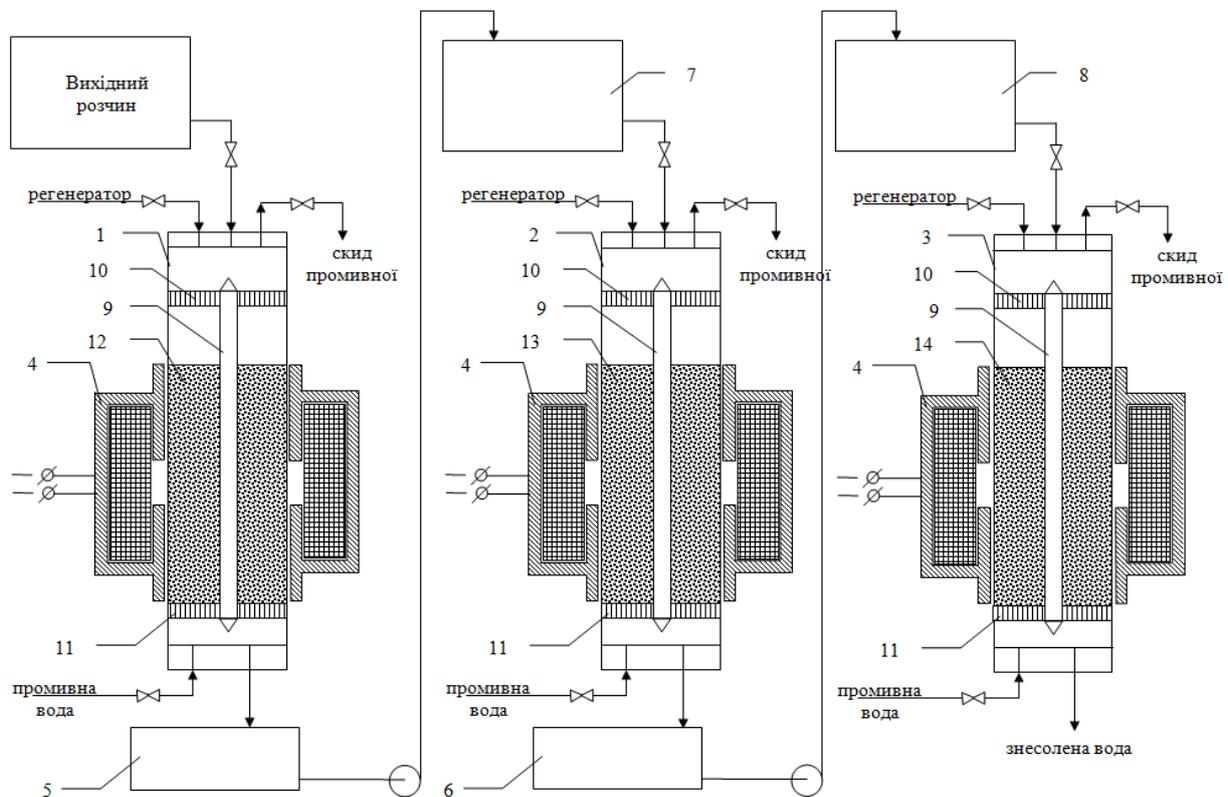


Рис. 1. Схема лабораторної установки
Fig. 1. Schematic of the laboratory setup

Установка складається з трьох іонообмінних колон, одна з яких (1), призначалася для видалення з води солей жорсткості (катіоніт КУ-2×8 в Н-формі – (12), друга – (2) – для видалення сульфат-іонів (аніоніт АН-22 в ОН-формі – (13), третя – (3) – для видалення хлорид-іонів (14). Фільтрат води після першої і другої іонообмінних колон поступав відповідно в збірні ємності (5) і (6), звідки

подавався в ємності (7) та (8) і далі на іонообмінні колони (2) і (3). В середину іонообмінних колон поміщався сталевий сердечник (9), центральне положення якого визначалося фіксуючими кільцями (10). У нижній частині фільтру був влаштований дренаж (11) у вигляді перфорованої скляної пластинки, що служить для відведення профільтрованої води і запобігання винесенню

іонообмінного матеріалу разом з фільтратом. В якості магнітних модифікаторів використано електромагніт (4), в робочий зазор якого поміщена іонообмінна колона. Залежно від мети експерименту працювали одна, дві або три колони іонообмінного очищення, які завантажувалися відповідно катіонами КУ-2×8 і аніонами АН-22. В якості регенераційних розчинів використані 25 % HNO₃ (катіоніт КУ-2×8), 10 % NH₄OH (аніоніт АН-22).

Якісна характеристика модельної води наведена нижче:

температура, °С	10,8...12,6
вміст завислих речовин, мг/дм ³	10,8
рН	7,8...8,1
загальна жорсткість, мг-екв/дм ³	6,4...6,6
лужність, мг-екв/дм ³	2,4...2,6
забарвленість, градус ПКШ	28...31

Процес іонного обміну складається з кількох стадій:

- перенесення іонів з розчину до поверхні зерна іоніту за рахунок дифузії;
- проникнення іонів всередину іоніту за рахунок дифузії частинок у сорбенті;
- хімічний процес іонного обміну;
- переміщення іона, що звільнився в результаті обміну, до поверхні зерна;
- переміщення іона із зерна в розчин.

Сумарна швидкість гетерогенного процесу визначається швидкістю найповільнішої стадії, яка є іонною реакцією і зазвичай протікає швидко. Дифузія речовин у рідині відносно повільний процес. Ще повільніше здійснюється дифузія в пористому твердому тілі. Тому саме ці стадії зазвичай зумовлюють швидкість іонообмінного очищення води. Коефіцієнти дифузії іонів можна вважати постійними і вони визначаються їхньою рухливістю. Значення коефіцієнта дифузії зростають відповідно до зменшення радіуса гідратованих іонів і знижуються в разі підвищення зарядів іонів. Він також залежить від гідратації функціональних груп, їхнього числа, від інтенсивності взаємодії протіоіонів з фіксованими групами та деяких ін. чинників з [20].

Магнітна модифікація іонітів може призвести до зміни ступеня гідратації сорбованих іонів і дифузійних груп іонообмінних смол, що може спричинити збільшення рухливості іонів. Магнітна модифікація іонітів може призвести до зміни ступеня гідратації сорбованих іонів і дифузійних груп іонообмінних смол, що може спричинити збільшення рухливості іонів. Останнє призводить до підвищення коефіцієнта дифузії (табл. 1), що підтверджується експериментами, описаними нижче, і знаходить вираження в інтенсифікації іонообмінних процесів у процесі коригування мінерального складу природних і стічних вод.

Табл. 1. Зміна коефіцієнта дифузії Ca²⁺ іону за магнітної модифікації катіоніту КУ 2x8

Table 1. Changes in the diffusion coefficient of Ca²⁺ ion under magnetic modification of KU 2×8 cationite

Тип іонообмінника	Кількість дослідів	Тривалість дослідів	К-т дифузії (Д), см ² /с	Зміна к-ту дифузії, %
Звичайний	3	5 год 58 хв	2,02×10 ⁻⁸	–
Модифікований	4	8 год 23 хв	2,78×10 ⁻⁸	37,6
Модифікований	4	8 год 05 хв	2,41×10 ⁻⁸	19,3

При виконанні досліджень з використанням магнітної модифікації іонообмінних смол визначали динамічну обмінну ємність, розраховували кількість сорбованих іонів, вимірювали витрату регенераційних

розчинів і тривалість фільтроциклу до проскоку за різного еквівалентного відношення регенератора до завантаження іоніту. Результати досліджень наведені в таблицях 2 та 3.

Табл. 2. Зміна робочої ємності та витрата 5 % HNO₃ залежно від умов регенерації при магнітній модифікації катіоніту КУ-2х8

Table 2. Change in working capacity and consumption of 5 % HNO₃ depending on regeneration conditions during magnetic modification of cationite KU-2x8

Показники	Зміна показників					
	Звичайна фільтрація	Фільтрація за магнітної модифікації				
Еквівалентність кислоти по відношенню до завантаження катіоніту КУ-2х8	2,18	2,18	2,02	1,95	1,85	1,72
Час роботи фільтра, год	28	35	35	35	34	27
Кількість сорбованих солей жорсткості, мг-екв	21548	26936	26908	26852	26276	20865
Робоча динамічна обмінна ємність динамічна обмінна ємність, мг-екв/м ³	1077	1347	1345	1342	1314	1043
Зміна динамічної робочої ємності, %	–	+25	+24,8	+24,6	+22,0	-32
Витрата 5 % HNO ₃ на регенерацію, л	79,9	79,9	74,0	71,5	68,0	63,0
Зменшення витрати кислоти, %	–	–	-7,9	-11,9	-17,9	-26,8

Табл. 3. Зміна робочої ємності та витрата 5-% NH₄OH залежно від умов регенерації при магнітній модифікації аніоніту АН-22

Table 3. Change in working capacity and consumption of 5 % NH₄OH depending on the regeneration conditions during magnetic modification of anionite AN-22

Показники	Зміна показників					
	Звичайна фільтрація	Фільтрація за магнітної модифікації				
Еквівалентність аміаку по відношенню до завантаження аніоніту АН-22	4,66	4,66	4,32	4,12	3,85	3,55
Час роботи фільтра, год	14	17	17	15	13	12
Кількість сорбованих іонів, мг-екв	6748	8194	8168	7222	6246	5784
Робоча динамічна обмінна ємність динамічна обмінна ємність, мг-екв/м ³	337	409	408	361	312	289
Зміна динамічної робочої ємності, %	–	+21,3	+21,0	+7,1	-8,0	-16,6
Витрата 5 % NH ₄ OH на регенерацію, л	41,7	41,7	38,5	36,8	34,5	31,7
Зменшення витрати аміаку, %	–	–	-3,8	-13,3	-20,8	-31,5

Використання магнітної модифікації катіоніту КУ-2х8 дає змогу зменшити надлишок кислоти, необхідної на регенерацію, на 11,7-17,0 % за незмінних тривалості фільтроциклу, об'єму фільтрату та забезпечення динамічної обмінної ємності, що відповідає оптимальному режиму фільтрування. Кількість сорбованих солей жорсткості за зменшення надлишку кислоти, у разі магнітної модифікації катіоніту, практично така сама, як і в разі оптимального режиму регенерації за еквівалентності кислоти по відношенню до завантаження катіоніту і складає 2,18. Еквівалентність 1,85 і 1,95 відповідає кількості сорбованих солей 26276 і 26852 мг-екв, 2,18 – 26936 мг-екв, тобто кількість сорбованих іонів у разі магнітної модифікації катіоніту, відрегенованого кислотою з меншим її надлишком, практично однакова – така сама, як і в разі регенерації з надлишком кислоти 2,18.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Для інтенсифікації процесів іонного обміну в системах водопостачання запропоновано спосіб коригування мінерального складу природних і стічних вод з використанням модифікованих іонообмінників, який передбачає одночасну дію магнітного поля на іонообмінник і воду, що очищується.

2. Використання магнітної модифікації іонообмінників є доцільним для покращення процесу водопідготовки, оскільки воно призводить до зменшення еквівалентності кислоти, збільшення кількості солей, що сорбуються, та підвищення робочої динамічної обмінної ємності:

– еквівалентність кислоти по відношенню до завантаження катіоніту зменшується від 2,18 до 1,72, що свідчить про збільшення ефективності очищення води внаслідок застосування магнітної модифікації;

– при використанні магнітної модифікації тривалість фільтроциклу збільшується, що показує можливість ефективного використання даної технології без значного збільшення часу обробки;

– кількість сорбованих солей жорсткості збільшується при використанні магнітної

модифікації, що свідчить про покращення якості очищення води від накопичених солей;

– робоча динамічна обмінна ємність також збільшується, що свідчить про покращення здатності іонообмінника збирати забруднення.

Слід зазначити, що використання фізичних методів для інтенсифікації процесів іонного обміну в системах водопостачання потребує проведення додаткових досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Gupta V. K., Islam M. R., Pradeep T.** Advances in Water Purification Techniques: Meeting the Needs of Developed and Developing Countries / Elsevier, 2018. 440 p. ISBN: 9780128147900
2. **Handbook of Industrial Water Treatment.** Chapter 08 – Ion Exchange, Water Demineralization & Resin Testing / Veolia. URL: <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-08-ion-exchange>
3. **Alkhadra M. A., Su X., Suss M. E., Tian H., Guyes E. N., Shocron A. N., Conforti K. M., de Souza J. P., Kim N., Tedesco M., Khoiruddin K., Wenten I. G., Santiago J. G., Hatton T. A., Bazant M. Z.** Electrochemical Methods for Water Purification, Ion Separations, and Energy Conversion // Chemical Reviews, 2022, 122(16), 13547–13635.
4. **Dushkin S., Martynov S., Dushkin S.** The increasing efficiency of upflow clarifiers at the drinking water preparation // Acta Periodica Technologica, 2020, 50, 17-27.
5. **Zelenko Yu., Malovanyu M., Tarasova L.** Optimization of heat and plants water purification // Chem. Chem. Technol., 2019, Vol. 13. No. 2, 218-223.
6. **Handbook of Industrial Water Treatment.** Chapter 01 – Water Sources, Impurities in Water and Chemistry. / Veolia. URL: <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-01-water-sources-impurities-and-chemistry>
7. **Когановский А. М.** Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных вод. К.: Наук. Думка, 1983. 236 с.
8. **Gupta, V. K., Ali, I., Saleh, T. A., Nayak, A., & Agarwal, S.** Chemical treatment technologies for waste-water recycling—an overview // RSC Advances, 2012, 2(16), 6380.
9. **Manahan S. E.** Environmental Chemistry, 2022.
10. **Kovtun D., Dushkin S.** Analysis of existing methods for improving the physical and chemical conditions of the ion exchange process in water

treatment // *Technogenic and ecological safety*, 2023. 14(2/2023), 92–97. <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18865>

11. **Jaseliunaite J., Galdikas A.** Kinetic Modeling of Grain Boundary Diffusion: The Influence of Grain Size and Surface Processes // *Materials* 2020, 13(5), 1051

12. **Jakops E.** The Dependency of Diffusion Coefficients and Geometric Factor on the Size of the Diffusing Molecule: Observations for Different Clay-Based // *Materials* 2017. Article ID 8652560.

13. **Ivanov V. A., Khamizov R. Kh.** Role of temperature in ion-exchange processes of separation and purification // *Ion-Exchange Chromatography and Related Techniques*, 2024, 591–614.

14. **Mir N., Bicer Y.** Thermodynamic modeling of a combined photo-electrodialysis-chloralkali system for sustainable desalination // *Desalination*, 2021, 499, 114822.

15. **Запольський А. К., Мішкова-Клименко Н. А., Астрелін І. М. та ін.** Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод. Київ: Лібра, 2000. 552 с.

16. **Архангельский Л. К., Матерова Е. А., Михайлова С. С., Лепнев Г. П.** Термодинамика ионного обмена. Минск, 1968. 230 с.

17. **Солдатов В. С., Новицкая Л. В.** Термодинамика ионного обмена. Минск: Наука, 1968. 212 с.

18. **Душкін С. С.** Дослідження динаміки процесів іонного обміну під час водовідготовки // Матер. міжнар. наук.-техн. конф. "Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні" 6-7.12.2023. Одеса. С. 101-102. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19007>

19. **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, 7(6), 01–06.

20. **Лифшиц О. В.** Справочник по водоподготовке котельных установок. Москва: Энергия, 1976. 288 с.

REFERENCES

1. **Gupta, S. S., Islam, M. R., & Pradeep, T. (2018).** *Advances in Water Purification Techniques: Meeting the Needs of Developed and Developing Countries*. Elsevier.

2. **Veolia.** *Handbook of Industrial Water Treatment*. Chapter 08 – Ion Exchange, Water Demineralization & Resin Testing. Retrieved from <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-08-ion-exchange>.

3. **Alkhadra, M. A., Su, X., Suss, M. E., Tian, H., Guyes, E. N., Shocron, A. N., Conforti, K. M., de Souza, J. P., Kim, N., Tedesco, M., Khoiruddin, K., Wenten, I. G., Santiago, J. G., Hatton, T. A., & Bazant, M. Z. (2022).** Electrochemical Methods for Water Purification, Ion Separations, and Energy Conversion. *Chemical Reviews*, 122(16), 13547–13635. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00396>

4. **Dushkin, S., Martynov, S., & Dushkin, S. (2020).** The increasing efficiency of upflow clarifiers at the drinking water preparation. *Acta Periodica Technologica*, 51, 17–27. <https://doi.org/10.2298/apt2051017d>

5. **Zelenko, Y., Malovanyy, M., & Tarasova, L. (2019).** Optimization of Heat-and-Power Plants Water Purification. *Chemistry & Chemical Technology*, 13(2), 218–223. <https://doi.org/10.23939/chcht13.02.218>

6. **Veolia.** *Handbook of Industrial Water Treatment*. Chapter 01 – Water Sources, Impurities in Water and Chemistry. Retrieved from <https://www.watertechnologies.com/handbook/chapter-01-water-sources-impurities-and-chemistry>

7. **Koganovsky, A. M. (1983).** *Adsorption and ion exchange in water treatment and wastewater treatment processes*. Kiev: Nauk. Dumka. [in Russian]

8. **Gupta, V. K., Ali, I., Saleh, T. A., Nayak, A., & Agarwal, S. (2012).** Chemical treatment technologies for waste-water recycling—an overview. *RSC Advances*, 2(16), 6380. <https://doi.org/10.1039/c2ra20340e>

9. **Manahan, S. E. (2022).** *Environmental Chemistry*. <https://doi.org/10.1201/9781003096238>

10. **Kovtun, D. & Dushkin, S. (2023).** Analysis of existing methods for improving the physical and chemical conditions of the ion exchange process in water treatment. *Technogenic and ecological safety*, 14(2), 92–97. Retrieved from <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/18865>

11. **Jaseliunaite, J., & Galdikas, A. (2020).** Kinetic Modeling of Grain Boundary Diffusion: The Influence of Grain Size and Surface Processes. *Materials*, 13(5), 1051. <https://doi.org/10.3390/ma13051051>

12. **Jacops, E., Aertsens, M., Maes, N., Bruggeman, C., Swennen, R., Krooss, B., Amann-Hildenbrand, A., & Littke, R. (2017).** The Dependency of Diffusion Coefficients and Geometric Factor on the Size of the Diffusing Molecule: Observations for Different Clay-Based Materials. *Geofluids*, 2017, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2017/8652560>

13. **Ivanov, V. A., & Khamizov, R. Kh. (2024).** Role of temperature in ion-exchange processes of separation and purification. *Ion-Exchange Chromatography and Related Techniques*, 591–614. <https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15369-3.00024-9>
14. **Mir, N., & Bicer, Y. (2021).** Thermodynamic modeling of a combined photo-electrodialysis-chloralkali system for sustainable desalination. *Desalination*, 499, 114822. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114822>
15. **Zapolsky, A. K., Mishkova-Klimenko, N. A., Astrylin, I. M., et al. (2000).** *Physico-chemical fundamentals of wastewater treatment technology*. Kyiv: Libra. 552. [in Ukrainian]
16. **Arkhangelsky, L. K., Materova, E. A., Mikhailova, S. S., & Lepnev, G. P. (1968).** *Thermodynamics of ion exchange*. Minsk. 230. [in Russian]
17. **Soldatov, V. S., & Novitskaya, L. V. (1968).** *Thermodynamics of ion exchange*. Minsk: Nauka. 212. [in Russian]
18. **Dushkin, S. S. (2023).** Study of the dynamics of ion exchange processes during water treatment. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "New and Unconventional Technologies in Resource and Energy Saving"*, December 6-7, 2023, Odessa, 101-102. Retrieved from <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19007> [in Ukrainian]
19. **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. <https://doi.org/10.22161/ijcmp.7.6.1>
20. **Lifshits, O. V. (1976).** *Handbook of water treatment for boiler plants*. Moscow: Energoizdat. [in Russian]

Intensification of ion exchange processes in water supply systems

Stanislav Dushkin, David Kovtun

In today's environment, special attention is paid to various methods of intensifying natural and wastewater treatment processes, improving existing treatment technologies, and introducing new methods and techniques to improve the quality of wastewater treatment and reduce the anthropogenic impact on the ecosystem. It is important to take into account not only the effectiveness of cleaning, but also its environmental friendliness and compliance with modern standards and requirements for environmental protection. This approach helps to ensure the sustainability of ecosystems and preservation of water resources for future generations.

The article highlights the issues related to the use of physical methods of water treatment in water supply systems. To intensify the processes of ion exchange in water supply systems, a method of adjusting the mineral composition of natural and waste water using modified ion exchangers is proposed, which involves the simultaneous action of a magnetic field on the ion exchanger and the water to be treated. The use of magnetic modification of ion exchangers allows to increase the productivity of water treatment facilities by an average of 25-30 %, with the receipt of filtrate of the required quality, to increase the duration of the filter cycle, to reduce the consumption of regenerative solutions, which indicates an increase in the efficiency of water treatment as a result of the use of magnetic modification.

An increase in the dynamic volume capacity of ion exchangers by 15-20 % was found, which indicates an improvement in ion exchange capacity due to the intensification of ion exchange processes in water supply systems. The intensification of ion exchange processes during the adjustment of the mineral composition of natural and wastewater using a magnetic field is determined by the following main factors: the effect of the magnetic field on the structure and properties of water filtered through the ionite and the effect of the magnet field on the activity and mobility of the exchanged ions, their diffusion and hydration, ion-exchange equilibrium, and other factors.

Key words: ion exchange, salt composition, modification of ion exchangers, diffusion coefficient, hydrated ions, magnetic water treatment.

Дата першого надходження рукопису 04.03.2026

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування 14.03.2026

Дата публікації 31.03.2026