

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ РОБОТИ ФІЛЬТРІВ З КАТАЛІТИЧНИМИ МАТЕРІАЛАМИ ЗА РАХУНОК ПРОТИТОЧНОЇ РЕГЕНЕРАЦІЇ

Віталій Стеценко¹, Олена Дупляк²

Київський національний університет будівництва і архітектури,
31, пр. Повітряних Сил, Київ, 03037, Україна

¹ stetsenko_viv-2022@knuba.edu.ua, orcid.org/0009-0000-4416-7206

² канд. тех. наук., dupliak.ov@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3500-5106

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.52.121-131

Анотація. Вода зі свердловин часто містить підвищений рівень заліза, марганцю, сірководню, солей жорсткості, нітратів, сульфатів і хлоридів. У деяких регіонах загальний вміст розчинених твердих речовин також є високим. Сучасні мембранні технології, такі як зворотний осмос і нанофільтрація, є ефективними рішеннями для зменшення вмісту мінералів, видалення нітратів для виробництва води, придатної як для пиття, так і для промислового використання. Однак перед мембранною обробкою дуже важливо видалити залізо, марганець і сірководень, оскільки ці сполуки сприяють утворенню неорганічних відкладень на поверхні мембран, що призводить до передчасного виходу мембран з ладу. Оптимальним є використання попередньої підготовки води за допомогою напірних фільтрів з використанням каталітичних фільтрувальних матеріалів, а потім дозування антискаланту перед мембранною системою. Хоча каталітичні матеріали використовуються в обробці води вже багато років, більшість виробників не надають чітких і практичних рекомендацій щодо їх використання в різних умовах.

Були проведені розрахунки для вибору та конфігурації фільтрів з каталітичними матеріалами Greensand Plus® та Filter Ox®. Встановлені оптимальні параметри та етапи роботи фільтрів. Досліджено вплив прямоточної та протиточної регенерації на якість очищеної води, тривалість циклу фільтрації та швидкість фільтрації. Пілотні випробування були проведені на установці потужністю до 1,0 м³/год на воді зі свердловини води з міста Ірпінь, Україна. Результати випробувань продемонстрували переваги протиточної регенерації над прямотною регенерацією, а також переваги фільтрувального матеріалу Greensand Plus®. Отримані результати дозволяють використовувати каталітичні матеріали перед мембранними технологіями для запобігання їх забрудненню.

Ключові слова: каталітичні матеріали, видалення заліза, видалення марганцю, фільтри для очищення води, Greensand Plus®, Filter Ox®.

ВСТУП

Вода зі свердловин є одним з основних джерел для локальних водоочисних станцій, промислових підприємств та приватних домогосподарств. Більшість підземних вод в Україні містять підвищений рівень заліза та марганцю. Якість підземних вод постійно контролюється: за результатами аналізу понад 40 000 проб води, взятих із свердловин, у понад 55 % проб концентрація заліза перевищувала допустимі норми, а перевищення норм марганцю було виявлено в понад 60 % із 7 500 проб, що були перевірені [1, 2]. Нормативи вмісту заліза та

марганцю в питній та водопровідній воді встановлені міжнародними, регіональними та галузевими стандартами [3-7]. У більшості цих документів вміст заліза не повинен перевищувати 0,2 мг/л, а марганцю – 0,05 мг/л. Сьогодні існує багато методів очищення води від заліза та марганцю, але всі вони мають як переваги, так і недоліки.

Найкращий метод – це той, який дозволяє досягти найнижчої можливої концентрації заліза та марганцю в очищеній воді, зберегти мінеральний склад води, не залишати небажаних побічних продуктів, є найбільш економічним і може бути максимально автоматизованим. Як

показано в [8, 9], найпопулярнішим методом видалення заліза і марганцю з підземних вод для невеликих потоків є використання методу іонного обміну, який базується на очищенні води за допомогою сильнокислотних іонообмінних смолах, комплексних матеріалів, таких як Ecomix®[10], або природних матеріалів на основі цеолітів, прикладом яких є Crystal Right®. У разі використання сильнокислотних іонообмінних смол не повинно бути попереднього збагачення води киснем при її надходженні у фільтри, значення рН води повинно бути менше 6,2, а фільтри регенеруються 6-8% розчином NaCl. Наявність розчиненого кисню в цьому методі є вкрай небажаною, оскільки гідроксид заліза (III), який осідає на іонообмінних матеріалах, ускладнює процес видалення розчиненого заліза, що робить необхідним проведення додаткової регенерації 1% розчином соляної кислоти перед кожною 10-ю регенерацією фільтра. Одночасне видалення іонів заліза та марганцю відбувається разом із видаленням солей кальцію та магнію, що погіршує фізіологічну повноцінність води і може сприяти корозії трубопроводів [1]. Цей метод також є досить дорогим, особливо при високих початкових значеннях загальної твердості [11], і не є екологічно безпечним з точки зору утворення великої кількості стоків з високим вмістом солей NaCl [12].

Біохімічний метод [13, 14] полягає у вирощуванні на зернах фільтруючого наповнювача бактерій, що споживають залізо-марганець, таких як Gallionella і Leptothrix, з подальшою фільтрацією обробленої води. Протягом свого життя бактерії поглинають залізо і марганець з води, а коли гинуть, утворюють велику кількість оксидів марганцю на зернах пористого фільтрувального матеріалу, який згодом слугуватиме додатковим каталізатором окислення Fe^{2+} і Mn^{2+} . При швидкості фільтрації до 22 м/год фільтри повністю видаляють марганець і залізо з води. Метод є перспективним, але має обмеження, яке полягає в необхідності точного дозування кисню, необхідного для життєдіяльності бактерій, а отже, і скрупульозної експлуатації всієї системи, а також у необхідності використання громіздких конструкцій, тому застосовується для середньої та великої продуктивності. Реагентний метод [15, 16]

використовується в промисловій водопідготовці для очищення великих і середніх обсягів води. Метод добре вивчений і базується на введенні в вихідну воду реагенту, який сприяє переходу двовалентного заліза в нерозчинену тривалентну форму. Як правило, це досягається двома способами – введенням окислювачів, таких як атмосферний кисень, озон, хлор і його сполук, перманганату калію, і з одночасним підвищенням рН води вище 8 за допомогою вапна, соди та інших речовин. Варто зазначити, що підвищення рН використовується в комплексній обробці води: пом'якшенні, видаленні заліза і марганцю, або якщо марганець і залізо присутні в складних органічних сполуках. Після окислення заліза і марганцю їх сполуки переходять в нерозчинні форми і затримуються в товщі фільтруючого матеріалу, після чого вода подається споживачеві. При видаленні тільки заліза найпоширенішим методом є обробка води безпечним і дешевим реагентом – атмосферним повітрям. Існує три найпоширеніші методи подачі повітря у воду – спрощена аерація (розпилення крапель води через розпилювальні форсунки), використання ежекторів для всмоктування повітря у потік води та аерація під тиском за допомогою компресорів. За допомогою спрощеної аерації вміст кисню у воді досягає 5 мг/л, що достатньо для окислення 35 мг/л Fe^{2+} . За допомогою цього методу зміни хімічного складу води мінімальні, органолептичні характеристики води поліпшуються, а мінеральний склад води залишається незмінним.

Каталітичний метод [17] полягає в окисненні заліза і марганцю в товщі каталітичного фільтруючого наповнювача, часто використовується в поєднанні з додатковою подачею повітря для прискорення реакції і зменшення витрати каталітичного матеріалу. Каталізатором для процесу в цьому методі зазвичай є діоксид марганцю, який наноситься у вигляді плівки на зерна фільтруючого матеріалу. Гідроксиди заліза, які утворюються на поверхні фільтрувального матеріалу під час роботи, в свою чергу, також є каталізаторами. Існує багато каталітичних матеріалів, кожен з яких має свої переваги та недоліки і умови застосування [18, 19]. Для відновлення каталітичних властивостей більшості матеріалів необхідна регенерація, щоб

відновити окислювальну здатність фільтрувального матеріалу. Проблема більшості комерційних каталітичних матеріалів [20-22] полягає в тому, що існує дуже обмежена кількість практичних рекомендацій щодо їх використання в конкретних випадках.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Метою даного дослідження є створення оптимальних режимів роботи фільтрів з каталітичними матеріалами в реальних умовах на свердловинній воді для отримання очищеної води з максимальним ступенем очищення від заліза і марганцю.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

- сформулювати основні вимоги до фільтрів з каталітичними матеріалами відповідно до технічних характеристик фільтрувальних матеріалів;
- розрахувати теоретичну проектну продуктивність і режими роботи фільтрів з каталітичними матеріалами;
- встановити оптимальні режими роботи фільтрів, підібрати оптимальні компоненти фільтрів для перевірки всіх режимів роботи фільтрів;
- провести випробування різних каталітичних матеріалів, дослідити вплив прямої та протиточної регенерації на тривалість циклу фільтрації, якість очищеної води та швидкість фільтрації;
- підтвердити можливість використання фільтрів з каталітичними матеріалами з періодичною регенерацією в реальних умовах на воді зі свердловини.

Гіпотеза дослідження передбачала можливість збільшення циклу фільтрації, підвищення швидкості фільтрації та отримання стабільної і кращої якості очищеної води після регенерації завдяки регенерації фільтра з періодичною регенерацією в режимі протиточної регенерації. Об'єктами дослідження були каталітичні фільтрувальні матеріали Greensand Plus® [20] виробництва компанії Inversand (США) та Filter Ox® [21] виробництва компанії Clack Corporation (США). Для управління процесами регенерації в автоматичному режимі використовувалися

регулюючі клапани V3435DV виробництва компанії Clack Corporation (США), які можуть працювати в прямооточному та протиточному режимі регенерації і мають гнучкі налаштування циклів регенерації. Для регенерації фільтрувального матеріалу використовували 4-7% гіпохлорит натрію ОНИКС (Україна). Для підвищення рН використовували фільтрувальний матеріал Calcite®, вироблений компанією Clack Corporation (США). Основні параметри фільтрувальних матеріалів, що впливають на розрахунки, наведені в табл. 1. Для порівняння фільтрувальних матеріалів робочі параметри фільтрів були однаковими.

Проектування фільтрів та налаштування фільтрів було виконано з урахуванням фізичних та технічних параметрів фільтрувальних матеріалів та рекомендацій виробника регулювального клапана і представлено в табл. 2. Розрахунок витрати зворотного промивання та вибір обмежувача потоку (DLFC) для зворотного промивання фільтра було розраховано за формулою:

$$Q_{bw} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot V_{f.m}, \quad (1)$$

де Q_{bw} – швидкість зворотного потоку, м³/год; d – діаметр фільтра, м; $V_{f.m}$ – швидкість зворотного потоку фільтруючого матеріалу, м/год.

Розрахунок витрати розсолу для низхідного та висхідного потоку та вибір інжектора були розраховані за формулою:

$$Q_{brine} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot V_{brine}, \quad (2)$$

де Q_{brine} – швидкість потоку розсолу, м³/год; d – діаметр фільтра, м; V_{brine} – швидкість потоку розсолу, м/год.

Проектна потужність була розрахована за допомогою:

$$C_f = \frac{RC_f}{Fe+2Mn+5H_2S}, \quad (3)$$

де C_f – ємність фільтра, м³; Fe – концентрація заліза, мг/л; Mn – концентрація марганцю у воді, мг/л; H₂S – концентрація сірководню у воді, мг/л.

Табл. 1. Фізичні та технічні характеристики Greensand Plus® та Filter Ox®**Table 1.** Physical and technical characteristics of Greensand Plus® and Filter Ox®

Назва ма-теріалу	Фізичні та технічні характеристики						
	Основа матеріалу	Покриття матеріалу	Фізична форма	Насипна вага, кг/м³	Питома вага, г/см³	Пористість	
Greensand Plus®	Кремнезем-ний пісок	5% MnO2	Чорні гранули, що в сухому вигляді	1410	2,4	0,45	
Filter Ox®	Кремнезем-ний пісок	12,5% MnO2	Гранули від сі-рого до чор-ного кольору	1345	2,7	0,5	
Назва ма-теріалу	Фізичні та технічні характеристики						
	Коефіцієнт однорідно-сті	Швидкість фільтрації, м/год	Швидкість зворотної промивки, м/год	Мінімальна висота, мм	Ємність за Fe ²⁺ , мг/л	Ємність за Mn ²⁺ , мг/л	Ємність за H ₂ S, мг/л
Greensand Plus®	≤ 1.6	12-30	30	762	350	180	70
Filter Ox®	≤ 1.51	5-30	30	760	530	265	106

Табл. 2. Технічні параметри фільтра та налаштування фільтра**Table 2.** Filter technical parameters and filter settings

Фільтр	Фізичні та технічні характеристики фільтрів					
	Типорозмір	Діаметр фільтру, м	Об'єм матеріалу фільтру, л	Об'єм підтримуючого шару, л	Висота шару в фільтрі, м	Завантаження фільтру, %
Greensand Plus®	10x54"	0,0254	35,5	4,3	0,7	65
Filter Ox®	10x54"	0,0254	35,5	4,3	0,7	65
Фільтр	Тип обмежувача потоку дренажу (DLFC), тип інжектору та налаштування регенерації					
	Тип DLFC за Clack	Тип інжектору за Clack	Тривалість зворотної промивки, хв	Тривалість обробки розчином прямої точної регенерації, хв	Тривалість обробки розчином, проти-точна регенерація, хв	Тривалість прямої промивки, хв
Greensand Plus®	65	V3010-1E	12	60	60	10
Filter Ox®	65	V3010-1E	12	60	60	10

Після проектування та розрахунків було побудовано випробувальну систему, яка показана на рис. 1. Перед введенням в експлуатацію та проведенням всіх випробувань фільтри були промиті від дрібних частинок завантаження та замочені гіпохлоритом натрію відповідно до рекомендацій виробників фільтрувального матеріалу.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Пілотні випробування проводилися на воді зі свердловини. Свердловина знаходиться в м. Ірпінь, Україна, на території ТОВ «НВО ЕКОСОФТ». Характеристики води на вході в свердловину наведені в табл. 3.

Зразки води після фільтрів відбиралися для визначення тривалості циклу фільтрації кожні 1000 літрів до досягнення розрахункових значень теоретичного циклу фільтрації, а потім кожні 500 л до підвищення рівня заліза вище 0,2 мг/л або марганцю вище 0,05 мг/л. Проби води після фільтрів для визначення впливу прямої чи проти-точної регенерації на якість води після регенерації відбирали відразу після регенерації і кожні 50 л до 250 л. Для визначення впливу типу регенерації на робочу швидкість потоку зразки відбирали при підвищенні швидкості потоку води 2 л/хв і продовжували до проскоку, доки рівень заліза не піднявся вище 0,2 мг/л або марганцю вище 0,05 мг/л.



Рис. 1. Пілотна установка фільтрів з фільтрувальними матеріалами Greensand Plus® та Filter Ox®: 1 – фільтр із матеріалом Greensand Plus®; 2 – фільтр із матеріалом Filter Ox®; 3 – аераційний бак із повітряним клапаном; 4 – перепускний кран; 5 – повітряний інжектор; 6 – панель приладів із манометрами та кранами для відбору проб води; 7 – фільтр із наповнювачем Calcite®; 8 – вхід води; 9 – зливний трубопровід; 10 – трубопровід чистої води

Fig. 1. Pilot plant for testing filters with filter media Greensand Plus® and Filter Ox®: 1 – Greensand Plus® filter; 2 – Filter Ox® filter; 3 – Aeration tank with air valve; 4 – Bypass valve; 5 – Air injector; 6 – Instrument panel with pressure gauges and water sampling valves; 7 – Calcite® filter; 8 – Water inlet; 9 – Drain pipe; 10 – Clean water pipe

Табл. 3. Фізичні та хімічні параметри води зі свердловини, що надходила до фільтрів
Table 3. Physical and chemical parameters of well water that entered to filters

Показник	Одиниці виміру	Показники	Середні показники*
pH	одиниці	6,75 – 6,85	6,8
Кольоровість	градуси	10 – 16	13
Сухий залишок (TDS)	мг/дм ³	230 – 250	240,0
Жорсткість	ммоль/дм ³	2,05 – 2,15	2,1
Залізо	мг/дм ³	3,5 – 4,3	3,9
Марганець	мг/дм ³	0,21 – 0,26	0,23
Температура	°C	8 – 12	10

* Середнє значення – використовувалося для розрахунку проектної продуктивності фільтрів

Для оцінки ефективності фільтрів визначалися такі параметри: температура, рН, TDS, загальна твердість, вміст заліза і марганцю у вхідній і очищеній воді за методами, наведеними в [3, 4]. Результати дослідження процесу фільтрації на фільтрувальних матеріалах Greensand Plus® і Filter Ox® залежно від типу регенерації показані на рис. 2 і рис. 3.

Основні висновки, що впливають з проведених досліджень:

- обидва фільтрувальні матеріали здатні видаляти залізо і марганець зі свердловинної води до необхідних рівнів;
- обидва фільтрувальні матеріали продемонстрували здатність видаляти забруднення до

необхідних стандартів протягом усього проектного циклу фільтрації, за винятком випадку використання Filter Ox® при прямоточній регенерації. У цьому режимі після 75 % проектного циклу фільтрації спостерігалось збільшення вмісту марганцю;

- фільтруючий матеріал Greensand Plus® має кращу робочу здатність, хоча фільтруючий матеріал Filter Ox® має більшу кількість MnO_2 у своєму складі, а ємність заявлена виробником до видалення забруднень на 20 % вища;
- протиточна регенерація забезпечує до 30 % довший цикл фільтрації.

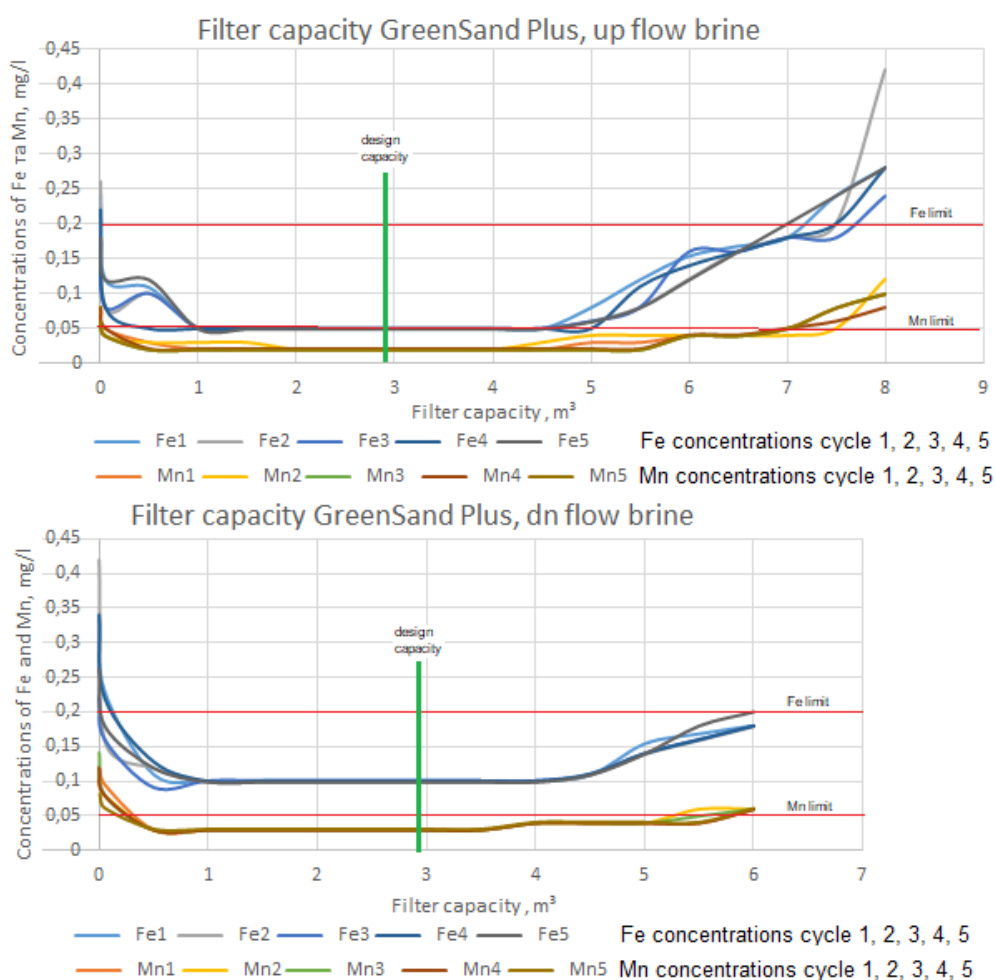


Рис. 2. Тривалість циклу фільтраційної здатності фільтра з Greensand Plus® залежно від типу регенерації

Fig. 2. Duration of filtration capacity cycle for filter with Greensand Plus® depending on the type of regeneration

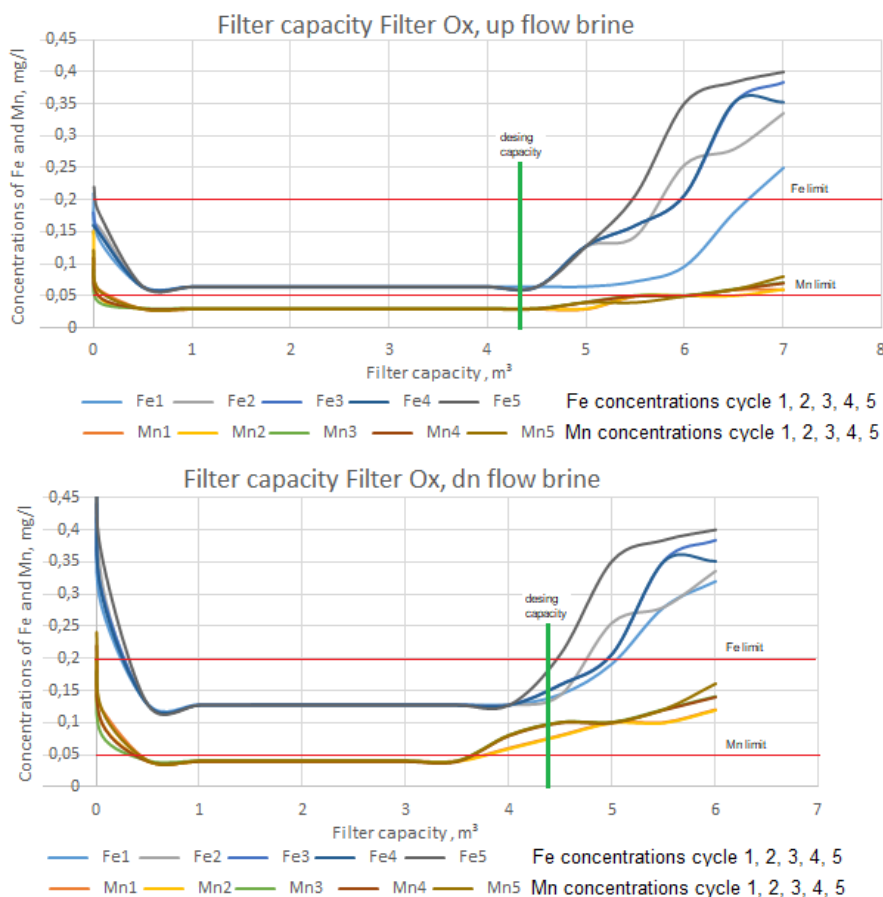


Рис. 3. Тривалість циклу фільтраційної ємності фільтра з Filter Ox® залежно від типу регенерації
Fig. 3. Duration of filtration capacity cycle for filter with Filter Ox® depending on the type of regeneration

Після отримання перших результатів всі подальші випробування проводилися тільки для GreenSand Plus®, як для більш перспективного фільтрувального матеріалу. Крім того, було досліджено вплив типу регенерації на швидкість потоку в робочому режимі, а також концентрації забруднюючих речовин на початку робочого режиму після регенерації. Припускалося, що протиточній регенерації будуть досягнуті кращі результати якості води та вищі швидкості фільтрації води. Такі припущення були висунуті на підставі того, що під час протиточної регенерації концентрований чистий розчин буде подаватися до нижніх шарів фільтрувального матеріалу, які є умовно не забрудненими. Крім того, при протиточній регенерації не відбувається переміщення забруднюючих речовин, які більш концентровані у верхній частині фільтра, до нижніх, чистіших шарів фільтрувального матеріалу. На рис. 4 показано, що при протиточній регенерації швидкість потоку в середньому збільшується на 20 %. Ці результати

щодо швидкості потоку були досліджені в середині (3...4 м³) тривалості режиму фільтрації. Регенерація фільтра в протиточному режимі дозволяє отримати воду високої якості відразу після закінчення регенерації та переходу фільтра в робочий режим, тоді як регенерація проточному режимі дозволяє отримати низькі значення забруднюючих речовин лише після 60-80 літрів води, що відповідає повному об'єму води випробуваної установки.

ВИСНОВКИ

В ході роботи було встановлено, що каталітичні матеріали, імперговані діоксидом марганцю, добре видаляють залізо і марганець. Регенерація фільтруючих матеріалів в періодичному режимі добре зарекомендувала себе в видаленні заліза і марганцю до необхідних рівнів. Крім того, періодична регенерація з використанням хлору, на відміну від безперервної регенерації з використанням подачі хлору, забезпечує якість води без залишкового хлору, без запаху і смаку хлору.

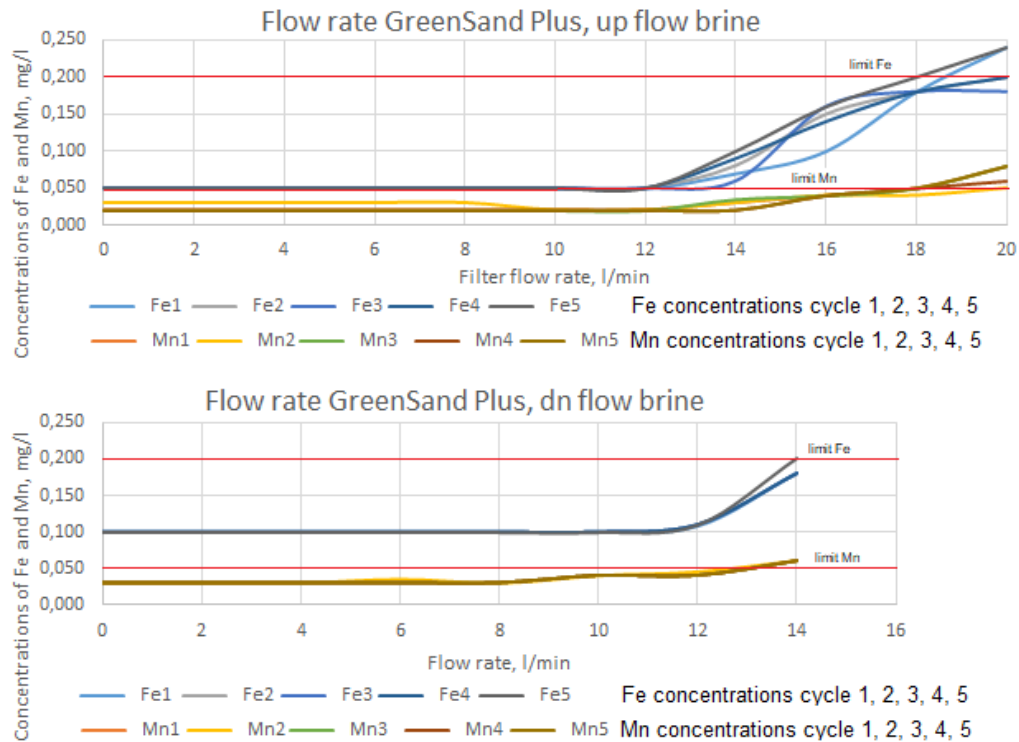


Рис. 4. Швидкість потоку для фільтра з Greensand Plus® залежно від типу регенерації
Fig. 4. Flow rate for filter with Greensand Plus® depending on the type of regeneration

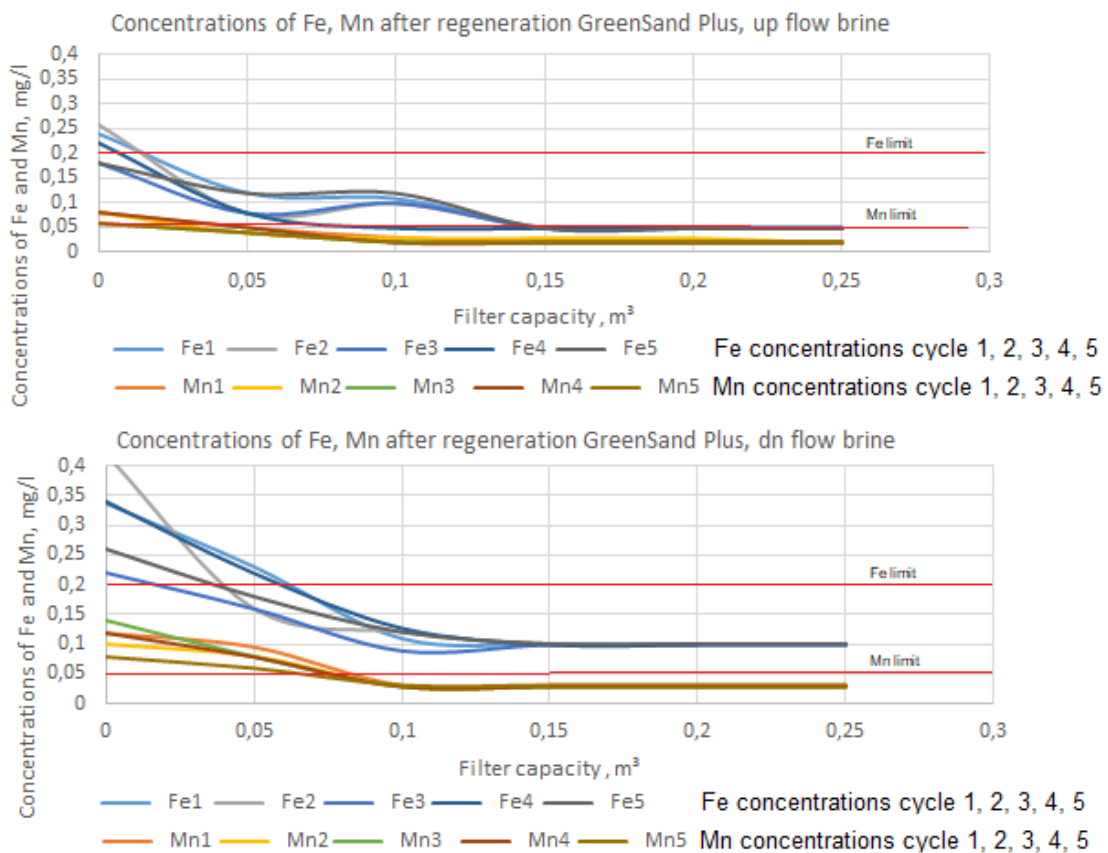


Рис. 5. Концентрація Fe, Mn для фільтра з Greensand Plus® залежно від типу регенерації
Fig. 5. Concentration of Fe, Mn for filter with Greensand Plus® depending on the type of regeneration

Проведений дослід показав, що використання фільтрувального матеріалу GreenSand Plus® забезпечує кращі показники в порівнянні з Filter Ox®, що ще раз підтверджує його відмінні експлуатаційні властивості [19]. Пілотні випробування дозволили підібрати оптимальну тривалість етапів регенерації фільтра в різних режимах регенерації. В ході роботи також було підтверджено, що наявність кисню і підвищення рН на 0,2...0,3 одиниці сприятливо впливають на видалення забруднюючих речовин до необхідних стандартів. Використання матеріалу Calcite® в потоці підвищує рН води в вузькому діапазоні, а також не збільшує значно твердість і сухий залишок. Найкращі результати були досягнуті при протиточному режимі регенерації, що дозволяє досягти більшої робочої ємності фільтруючого матеріалу, і, як наслідок, можна збільшити режим роботи фільтра до 30 %. Регенерація в протиточному режимі дозволяє збільшити робочу швидкість потоку на 20 %, що може дозволити використовувати менші фільтри для досягнення необхідної продуктивності фільтра. Показники якості води після регенерації при протиточній регенерації також значно кращі, особливо після режиму регенерації.

Всі ці переваги протиточної регенерації дозволяють проектувати вдосконалені системи водоочищення, особливо для малих і середніх потужностей, для побутового та комерційного застосування. Слід зазначити, що спроектована і побудована пілотна установка не буде зручною для кінцевого користувача через її громіздкість і необхідність використання гіпохлориту натрію в рідкому вигляді. Тому наступним кроком буде прагнення перетворити систему на одно апаратний автоматичний фільтр, а також випробувати варіанти використання хлорних таблеток як реагенту, а також використання озону як реагенту для періодичної регенерації фільтру.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дрикер Е., Мітченко Т. Оптимізація витрат на організацію децентралізованого підземного джерела питної води // Вода і водоочисні технології. 2020. 28(3), 48–60.
2. Карта якості води України. URL: <https://waternet.ua/ok> last accessed 2025/09/15

3. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Наказ № 400 від 12.05.2010. Міністерство охорони здоров'я України. [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення 15.09.2029). – Назва з екрану.
4. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast) (Text with EEA relevance). [Електронний ресурс] URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>
5. National Primary Drinking Water Regulations. EPA 816-F-09-004 (2009). [Електронний ресурс] URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf
6. Guidelines for Drinking-Water Quality (2017). World Health Organization. [Електронний ресурс] URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
7. FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual. Water Solutions (2023). [Електронний ресурс] URL: <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf>
8. Андрусишина І. М., Бурлакова В. С., Василюк С. Л., Дрікер Ю. Д., Косогін, О. В., Косогіна, І. В., Шахновський, А. М. Сучасні способи очищення води. Колективна монографія. 2024.
9. BWT Group, Ecosoft Ukraine, Ecomix. Високо-ефективне комплексне рішення для складних водних комплексів. [Електронний ресурс] URL: <https://www.ecosoft.com/ecomix-calculator>, (дата звернення 16.09.2029). – Назва з екрану.
10. Cavada L. Corrosion of galvanized steel pipes for hot and cold water sanitary system circuits, 2023.
11. Bakshi B., Doucette E. M., Kyser S. J. Centralized softening as a solution to chloride pollution: An empirical analysis based on Minnesota cities // PloS one, 2021, 16.2: e0246688.
12. Квартенко О. Використання біологічного методу очищення залізовмісних підземних вод // Журнал розвитку водних та земельних ресурсів, 2018, 39. 77-82.
13. Hameed S., Awad H. A., Al-Uqaily R. A. H. Removal of iron and manganese from ground water by different techniques // The Journal of Research on the Lepidoptera, 2019, 50(4). 458-468.
14. Alsaeed R. D., et al. Response surface modeling of sodium hypochlorite-based manganese oxidation in

drinking water // DYSONA-Applied Science, 2025, 6(2). 334-342.

15. **Zhang Yu., et al.** Research on removal of manganese in drinking water by potassium permanganate // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2021. 01025.

16. **Sah, C. K. S., Amatya I. M.** The Kinetics of manganese removal from bore well water using Katalox Light, Birm and ISR // Journal of Innovations in Engineering Education, 2021, 4.2: 71-74.

17. **Lim L. P.** Removal of iron from water using oxidation process // UTAR, 2021.

18. **Стеценко В., Дупляк О.** Аналіз сучасних фільтруючих матеріалів для видалення заліза та марганцю // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2024, 48. 87-95

19. **Skoczko I.** Efficiency estimation of water purification with various filtration materials // Desalination and Water Treatment, 2018, 134. 99-108.

20. **Greensand Plus®** The Inversand Company. [Електронний ресурс] URL: <https://www.inversand.com/> (дата звернення 15.08.2025). – Назва з екрану.

21. **FilterOx®.** Clack Corporation. [Електронний ресурс] URL: <https://www.clackcorp.com/products/filter-ox/> (дата звернення 15.08.2025). – Назва з екрану.

22. **Katalox Light®.** Watch-Water® Germany [Електронний ресурс] URL: https://www.watchwater.de/wp-content/uploads/2019/01/KL_Brochure_NEW_ver_1.1.pdf (дата звернення 15.08.2025).

REFERENCES

1. **Driker, Y., & Mitchenko T. (2020).** Optimization of cost for organization of cost for water purification technologies. *Scientific and technical news*, 28(3), 48–60. <https://doi.org/10.20535/wptstn.v28i3.218556>

2. **Waternet.ua.** Water quality map of Ukraine. Retrieved from <https://waternet.ua/water-map-en>

3. **Ministry of Health of Ukraine (2010).** Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl «Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoi dlia spozhyvannia liudynoiu». Order, Norms, Rule [...] on May 12, 2010 № 400. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>, last accessed 2025/09/15

4. **Directive (EU) 2020/2184** of the European Parliament and of the Council of 16 December 2020 on the quality of water intended for human consumption (recast) (Text with EEA relevance). Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj>

5. **U.S. Environmental Protection Agency (2009).** National Primary Drinking Water Regulations. EPA 816-F-09-004. Retrieved from

<https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>

6. **World Health Organization (2017).** Guidelines for Drinking-Water Quality. Retrieved from <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>

7. **FilmTec™ (2023).** Reverse Osmosis Membranes Technical Manual. Water Solutions Retrieved from <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf>

8. **Andrusyshyna, I. M., Burlakova, V. S., Vasilyuk, S. L., Driker, Yu. D., Kosogin, O. V., Kosogina, I. V., ... & Shakhnovsky, A. M. (2024).** Modern ways to clean water. Collective monograph. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67094> [in Ukrainian]

9. **BWT Group, Ecosoft Ukraine, Ecomix.** Highly efficient comprehensive solution for complex water. <https://www.ecosoft.com/ecomix-calculator>, last accessed 2025/09/16

10. **Cavada, L. (2023).** Corrosion of galvanized steel pipes for hot and cold water sanitary system circuits. Tesi di laurea Magistrale. Retrieved from <https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/226257>

11. **Bakshi, B., Doucette, E. M., & Kyser, S. J. (2021).** Centralized softening as a solution to chloride pollution: An empirical analysis based on Minnesota cities. *PloS one*, 16(2). e0246688. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246688>

12. **Kvartenko, O., Sabliy, L., Kovalchuk, N., & Lysytsya, A. (2018).** The use of the biological method for treating iron containing underground waters. *Journal of Water and Land Development*, 39(1). 77-82. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0061>

13. **Hameed, S., Awad, H. A., & Al-Uqaily, R. A. H.** Removal of iron and manganese from ground water by different techniques. *The Journal of Research on the Lepidoptera*, 2019, 50(4). 458-468. <https://doi.org/10.36872/lepi/v50i4/201110>

14. **Alsaeed, R. D., Aldarwish, A. Q., Khouri, L., & Kolluru, V. (2025).** Response surface modeling of sodium hypochlorite-based manganese oxidation in drinking water. *DYSONA-Applied Science*, 6. 334-342. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/390806519_Response_surface_modeling_of_sodium_hypochlorite-based_manganese_oxidation_in_drinking_water

15. **Zhang, Y., Dong, H., Yan, P., & Zheng, X. (2021).** Research on removal of manganese in drinking water by potassium permanganate. *E3S Web of Conferences*, 260, 01025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126001025>

16. Sah, C. K. S., & Amatya, I. M. (2021). The Kinetics of manganese removal from bore well water using Katalox Light, Birm and ISR. *Journal of Innovations in Engineering Education*, 4(2): 71-74. <https://doi.org/10.3126/jiee.v4i2.38769>
17. Lim, L. P. *Removal of iron from water using oxidation process*. UTAR, 2021. Retrieved from <http://eprints.utar.edu.my/id/eprint/5372>
18. Stetsenko, V., & Dupliak, O. (2024). Analysis of existent catalytic filter material for removal of iron and manganese. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic*, (48). 87-95. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.48.87-95>
19. Skoczko, I. (2018). Efficiency estimation of water purification with various filtration materials. *Desalination and Water Treatment*, 134, 99–108. <https://doi.org/10.5004/dwt.2018.22707>
20. The Inversand Company. Greensand Plus® Retrieved from <https://www.inversand.com/>
21. Clack Corporation. FilterOx® Retrieved from <https://www.clackcorp.com/products/filter-ox/>
22. Watch-Water® Germany (2019). Katalox Light® https://www.watchwater.de/wp-content/uploads/2019/01/KL_Brochure_NEW_ver_1.1.pdf

Intensification of the operation of filters with catalytic materials by up flow regeneration

Vitaliy Stetsenko, Olena Dupliak

Annotation. Well water often contains elevated levels of iron, manganese, hydrogen sulfide, hardness salts, nitrates, sulfates, and chlorides. In some regions, the total dissolved solids content is also significantly high. Modern membrane technologies such as reverse osmosis and nanofiltration offer effective solutions for reducing mineral content, removing nitrates, and producing water suitable for both drinking and industrial use. However, prior to membrane treatment, it is critical to remove iron, manganese, and hydrogen sulfide, as these compounds contribute to the formation of inorganic fouling on membrane surfaces, which leads to premature membrane failure. An optimal approach involves pretreatment with pressure filters using catalytic filtration media, followed by antiscalant dosing before the membrane system. While catalytic media have been used in water treatment for many years, most manufacturers do not provide clear and practical guidelines for their use under varying conditions.

Calculations were performed for the selection and configuration of filters with catalytic materials Greensand Plus® and Filter Ox®. Optimal parameters and operational stages of the filters were established. The impact of down flow and up flow regeneration on the quality of treated water, filter cycle duration, and filtration rate was investigated. Pilot tests were conducted on a unit with a capacity of 1.0 m³/h using well water from the city of Irpin Ukraine. Test results demonstrated the advantages of up flow regeneration over down flow regeneration, as well as the superiority of the Greensand Plus® filtering material. The results obtained enable the use of catalytic materials prior to membrane technologies to prevent fouling.

Keywords: Catalytic materials, iron removal, manganese removal, water treatment filters, Greensand Plus®, Filter Ox®.

Стаття надійшла до редакції 14.11.2025