

ДОСЛІДЖЕННЯ БЕЗРЕАГЕНТНОГО ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ВОДИ НА ОЧИСНІЙ УСТАНОВЦІ З БАГАТОКОМПОНЕНТНИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ Й АВТОМАТИЧНИМ КЕРУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ РЕЖИМАМИ

Тетяна Курбанова¹, Тетяна Хомуцька²

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

¹ kurbanova.tv@knuba.edu.ua, orcid.org/0009-0006-4265-2666

² докт. техн. наук, khomutetska.tp@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0003-0153-4920

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.52.56-66

Анотація. В статті представлено результати експериментального дослідження ефективності роботи установки безреагентного знезалізнання води "Formula Vody IRON CLEAR", що функціонує за принципом аерації за допомогою повітряної подушки та фільтрації крізь важке завантаження, що являє собою багатокомпонентну суміш матеріалів, в тому числі, з каталітичними властивостями. Актуальність роботи зумовлена поширенням проблеми підвищеного вмісту заліза в підземних джерелах водопостачання України та необхідністю впровадження надійних та економічно ефективних технологій для локальних систем. Для експериментальної оцінки ефективності роботи установки проведено три серії дослідів з використанням модельних розчинів, що імітують воду з різною вихідною концентрацією заліза, при різних гідравлічних режимах (зі швидкостями фільтрації 9,6 та 7,2 м/год). Аналіз отриманих результатів досліджень показав, що установка з вказаними параметрами роботи не забезпечує стабільного і тривалого очищення води до нормативних показників ДСанПіН 2.2.4-171-10 стосовно вмісту заліза (не більше 0,2 мг/дм³). Вже на початкових етапах роботи спостерігалось недопустиме винесення заліза разом з фільтрованою водою, що свідчить про нездатність системи працювати ефективно навіть у разі зменшення гідравлічних навантажень. Встановлено, що ймовірними причинами швидкої відмови системи забезпечити на виході нормативну якість фільтрованої води є: недостатній вміст кисню в повітряній подушці для тривалого перебігу процесу окиснення розчиненого у воді двовалентного заліза; недостатній період часу для здійснення коагуляції й формування пластівців гідроксиду заліза крупності, достатньої для їх затримання у фільтрувальному завантаженні без винесення у фільтровану воду; недостатня кількість каталітичного завантаження з діоксиду марганцю, що входить до складу багатокомпонентного фільтра, а також можливість його біологічного обростання; невдало підібраний режим зворотної промивки з параметрами, недостатніми для повного видалення накопичених забруднень; деградація і прогресуюча кольматація важкого завантаження фільтра, що призводить до фізичного блокування пор та зміни властивостей. Наведено рекомендації щодо відновлення працездатності системи та удосконалення технології знезалізнання води на очисній установці.

Ключові слова: знезалізнання, підземні води, безреагентні методи, каталітична фільтрація, повітряна подушка, біообростання, ефективність очищення, керуючий клапан.

ВСТУП

Забезпечення населення якісною питною водою є одним із ключових завдань сталого розвитку та національної безпеки. В умовах сучасних викликів, пов'язаних із суттєвим антропогенним навантаженням на довкілля

та необхідністю підвищення стійкості інфраструктури, особливої актуальності набуває використання підземних джерел водопостачання, які є краще захищеними від поверхневих забруднень.

Проте, як зазначається у багатьох дослідженнях, підземні води значної частини території України, зокрема північно-західних, центральних та деяких східних областей, характеризуються підвищеним вмістом заліза, концентрація якого може сягати 20 мг/дм^3 і вище, що значно перевищує нормативні вимоги, регламентовані ДСанПіН 2.2.4-171-10 (не більше $0,2 \text{ мг/дм}^3$) [1-5].

Надлишок заліза у воді призводить до низки технологічних та естетичних проблем: надає воді неприємного металевого присмаку та бурого забарвлення, спричиняє утворення іржавих плям на сантехніці та білизні, а також призводить до утворення відкладень у водопровідних мережах, що погіршує їх гідравлічні характеристики. Тому очищення води від надмірного вмісту заліза перед її подачею споживачам є обов'язковим етапом водопідготовки.

Аналіз існуючих технологій видалення заліза з підземних вод показав [1, 6-9], що за сприятливих умов ($\text{pH} \geq 6,7$; достатня лужність) найбільш перспективними і доцільними для локальних систем водопостачання являються безреагентні методи, застосування яких виключає вторинне забруднення води хімічними реагентами та є більш економічно вигідним для практики експлуатації.

У попередній роботі авторів [1] теоретично обґрунтовано переваги технології, що поєднує аерацію води киснем повітряної подушки, коагуляцію, каталітичне очищення та фільтраційні процеси з використанням багатокомпонентного фільтрувального завантаження.

Реалізувати таку технологію запропоновано на установці знезалізнення води з автоматизованим керуванням експлуатаційними режимами. Сучасні водоочисні системи, які оснащені автоматичними клапанами керування, вирізняються компактністю, автономністю та низькими експлуатаційними витратами, що робить їх оптимальним рішенням для невеликих населених пунктів та індивідуальних господарств.

Для підтвердження теоретичних переваг та оцінки реальної ефективності даної технології знезалізнення води виникла потреба

в проведенні серії експериментальних досліджень.

МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи полягає в експериментальній оцінці ефективності застосування технології безреагентного знезалізнення води на установці з автоматизованим керуванням й використанням повітряної подушки та багатокомпонентного фільтрувального завантаження, що являє собою суміш важких матеріалів, в тому числі, і з каталітичними властивостями. Такий принцип водоочистки було технічно реалізовано на комерційній установці "Formula Vody IRON CLEAR", що відкривало можливості для експериментальних досліджень стосовно запропонованої технології.

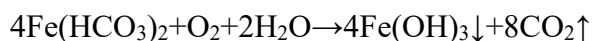
Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні задачі:

- описати методику проведення експериментальних досліджень з використанням модельних розчинів, що імітують підземну воду з різною вихідною концентрацією заліза;
- провести серії дослідів при різних гідравлічних режимах роботи установки для оцінки динаміки процесу знезалізнення;
- проаналізувати отримані експериментальні дані щодо зміни вмісту заліза у фільтрованої воді та водневого показника pH протягом часу проведення дослідження, порівнюючи їх з нормативними вимогами ДСанПіН 2.2.4-171-10;
- оцінити ефективність роботи установки за різних умов, при потребі науково обґрунтувати рекомендації щодо її удосконалення.

Об'єктом дослідження є установка знезалізнення води "Formula Vody IRON CLEAR", що являє собою напірний фільтр колонного типу, виготовлений з композитного матеріалу, оснащений автоматичним керуючим клапаном Clack WS1 (або його аналогом), який забезпечує переключення режимів роботи (фільтрація, зворотна промивка, регенерація) в автоматичному режимі.

Принцип дії установки базується на безреагентному методі окиснення та фільтрації,

що відповідає досліджуваній технології [1]. Процес знезалізнення відбувається у два етапи. На першому етапі вихідна вода, потрапляючи у верхню частину фільтраційної колони, проходить крізь повітряну подушку, що створюється під час циклу регенерації. При контакті з киснем повітря відбувається первинне окиснення розчиненого двовалентного заліза (Fe^{2+}) до тривалентної форми (Fe^{3+}) з утворенням нерозчинного гідроксиду заліза ($\text{Fe}(\text{OH})_3$) за реакцією:



На другому етапі вода проходить через шари багатокомпонентного фільтрувального завантаження, до складу якого входить і діоксид марганцю з вираженими каталітичними властивостями й розвиненою пористою поверхнею. Його функція полягає у прискоренні реакції окиснення заліза, що не встигло прореагувати у повітряній подушці. Відбувається коагуляція забруднень з утворенням пластівців гідроксиду заліза та їх подальше механічне затримання у товщі шарів фільтрувального завантаження.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ

З метою оцінки ефективності роботи установки проведено три серії експериментальних досліджень, які здійснювались в лабораторних умовах з попередньою підготовкою вихідної води. Для кожного експерименту готували модельний розчин, що імітував природну воду з підвищеним вмістом заліза. Ємність об'ємом 500 дм^3 заповнювали водопровідною водою, після чого вносили розраховану кількість залізного купоросу (Ферум сульфат гептагідрат $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) для досягнення цільової концентрації заліза у вихідній воді близько $1\text{--}2 \text{ мг/дм}^3$. Далі розчин ретельно перемішували механічною мішалкою з метою забезпечення гомогенності.

Експериментальні дослідження проводили за різних гідравлічних навантажень на фільтр, що дозволило оцінити його роботу в різних експлуатаційних режимах.

Дослід №1. Установка протягом усього періоду досліджень працювала за постійних технологічних показників, що відповідали

стандартному режиму для даного типу обладнання: витрата $Q = 8 \text{ дм}^3/\text{хв} = 0,48 \text{ м}^3/\text{год}$; швидкість фільтрації $V = 9,6 \text{ м/год}$. Початковий вміст заліза у вихідній воді становив $C_v = 1,20 \text{ мг/дм}^3$, водневий показник $\text{pH} = 7,68$.

Дослід №2. Початковий вміст заліза у вихідній воді $C_v = 1,28 \text{ мг/дм}^3$, водневий показник $\text{pH} = 8,23$. Експеримент був двоетапним. На першому етапі технологічні параметри були такими ж, як і в попередньому досліді: витрата установки $Q = 0,48 \text{ м}^3/\text{год}$; швидкість фільтрації $V = 9,6 \text{ м/год}$. Для оцінки впливу зміни гідравлічного режиму на ефективність очищення води від заліза після 30 хвилин роботи установки її витрату і швидкість фільтрації знижили, відповідно, до $Q = 0,36 \text{ м}^3/\text{год}$ та $V = 7,2 \text{ м/год}$.

Дослід №3. Для оцінки ефективності роботи установки при більших концентраціях заліза у вихідній воді й збільшеному часі контакту води з фільтруючим завантаженням вона увесь період досліджень працювала при постійних знижених технологічних показниках: $Q = 0,36 \text{ м}^3/\text{год}$ та $V = 7,2 \text{ м/год}$. При цьому початковий вміст заліза у вихідній воді становив $C_v = 1,98 \text{ мг/дм}^3$, а водневий показник знаходився на рівні $\text{pH} = 7,86$.

Після завершення кожного дослідження проводили примусову регенерацію установки знезалізнення води за методикою, описаною у роботі [1]. Згідно внутрішніх налаштувань автоматичного клапана керування Clack Impression Plus, час регенерації становив 20 хв, після чого установка знову була готова до експлуатації в робочому режимі.

Проби води для аналізу відбирали з двох точок: на вході в установку (після насоса, перед фільтром) та на виході з неї. Відбір проб здійснювали через спеціально встановлені крани-пробовідбірники. Періодичність відбору проб на виході становила від 5 до 10 хв, що дозволяло відстежувати динаміку процесу очищення в часі. У відібраних пробах визначали два ключові показники: концентрацію загального заліза фотоколориметричним методом та водневий показник pH за допомогою цифрового мультипараметрового приладу HQ40D.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Результати усіх трьох серій дослідів продемонстрували суттєві проблеми в роботі установки знезалізнення та її неможливість протягом тривалого часу забезпечити стабільну якість очищеної води, яка б відповідала нормативним вимогам.

Дослід №1. Динаміку зміни вмісту заліза у фільтрованій воді та показника рН під час проведення першого дослідів представлено на рис. 1.

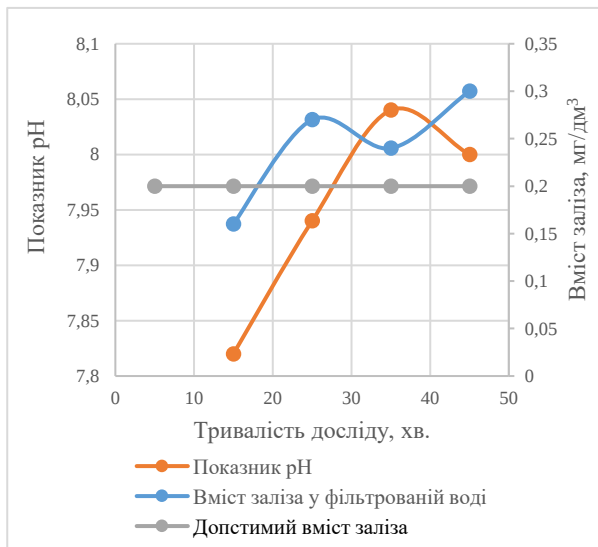


Рис. 1. Зміна показників рН та вмісту заліза у фільтрованій воді протягом дослідів №1

Fig. 1. Change in pH and iron content in filtered water during experiment No. 1

На початку експерименту через 15 хв роботи установки її ефективність становила 86,7 %, коли вміст заліза знижувався з 1,20 мг/ дм³ на вході у фільтр до рівня 0,16 мг/ дм³ на виході з нього, що не перевищував допустимого значення. Це свідчить про те, що на початковому етапі досліджень для окиснення двовалентного заліза достатньо і кисню в затиснутій повітряній подушці, і каталітичної ємності та брудозатримуючої здатності фільтрувального завантаження. Однак вже після 15-ої хвилини спостерігався так званий "проскок" забруднювача: концентрація заліза на виході починала поступово зростати, досягаючи 0,27 мг/ дм³ на 25-ій хвилині і 0,30 мг/дм³ на 45-ій хвилині фільтрування. Такий короткий термін ефективної роботи установки свідчить про

недостачу кисню у повітряній подушці та низьку каталітичну ємність фільтра зі швидким вичерпанням робочого ресурсу, що призводить до неспроможності повноцінного протікання процесу коагуляції з наступним затриманням забруднень у шарах фільтрувального завантаження. Водночас з рис. 1 бачимо, що показник рН очищеної води поступово зростає з 7,68 до 8,0, що є характерним для процесів аерації, під час яких видаляється розчинений вуглекислий газ CO₂, що призводить до підлужування води.

Дослід №2. Цей експеримент, що складався з двох етапів з різною швидкістю фільтрації, взагалі виявив нетипову поведінку системи водоочищення.

На етапі 1 протягом перших 30 хв роботи фільтра за швидкості фільтрації 9,6 м/год установка знезалізнення демонструвала відносно стабільну роботу і вміст заліза на виході утримувався на рівні близькому до норми (рис. 2).

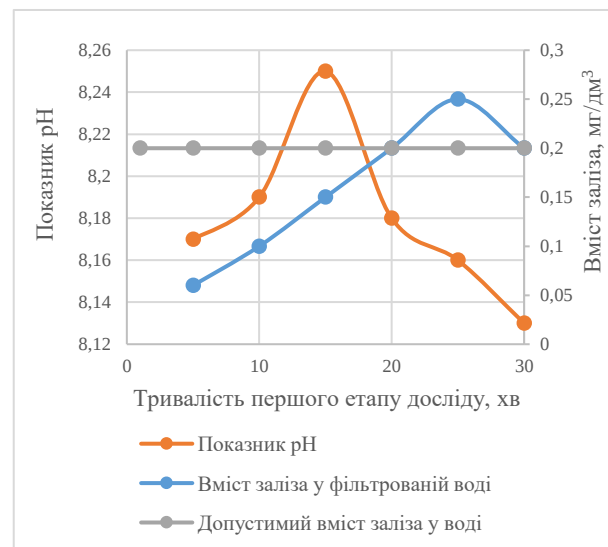


Рис. 2. Зміна показників рН та вмісту заліза у фільтрованій воді протягом першого етапу дослідів №2

Fig. 2. Change in pH and iron content in filtered water during the first stage of experiment No. 2

На етапі 2 після зниження швидкості фільтрації з 9,6 до 7,2 м/год, всупереч теоретичним очікуванням, ефективність роботи установки значно впала і фільтрована вода вже не відповідала нормативним показникам якості (рис. 3).

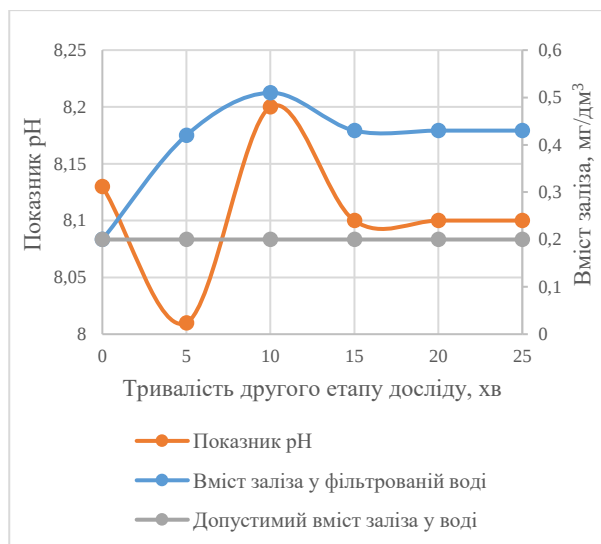


Рис. 3. Зміна показників рН та вмісту заліза у фільтрованій воді протягом другого етапу досліді №2

Fig. 3. Change in pH and iron content in filtered water during the second stage of experiment No. 2

Зниження швидкості потоку на етапі 2 досліджень мало б збільшити час контакту води з каталізатором і, відповідно, покращити ступінь очищення води. Однак вміст заліза у фільтрованій воді почав зростати і до кінця експерименту залишався на високому рівні, перевищуючи показник ГДК. Такий результат є аномальним і може свідчити про глибокі порушення у структурі та функціонуванні фільтруючого шару. Ймовірним поясненням може бути сильне "кольматування" (закупорювання) пор завантаження осадом гідроксиду заліза та біомасою. За вищої швидкості (9,6 м/год) потік води "пробирав" у заблокованому шарі окремі канали (явище "каналотворення"), якими і відбувався процес фільтрації. При зниженні швидкості до 7,2 м/год гідродинамічного тиску стало недостатньо для подолання опору цих каналів, що призвело до збільшення часу перебування води у найбільш застійних, анаеробних зонах фільтра. У цих зонах могли відбуватися процеси вторинного відновлення раніше осадженого $\text{Fe}(\text{OH})_3$ до розчинної форми Fe^{2+} , що й спричинило погіршення якості води на виході.

Дослід №3 виконували з вищою концентрацією заліза у вихідній воді ($C_{\text{в}} = 1,98 \text{ мг/дм}^3$) та зменшеною швидкістю

фільтрації до 7,2 м/год, а його результати (рис. 4.) підтверджують висновки, зроблені на основі аналізу досліді №2.

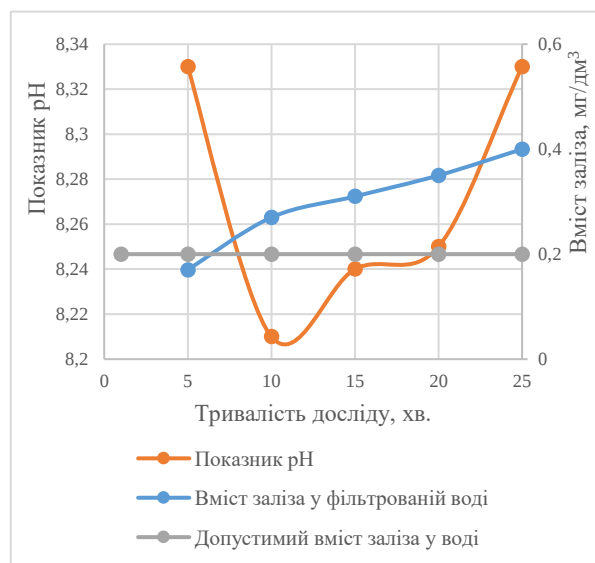


Рис. 4. Зміна показників рН та вмісту заліза у фільтрованій воді протягом досліді №3

Fig. 4. Change in pH and iron content in filtered water during experiment No. 3

Як видно з рис.4, установка знезалізнення не змогла забезпечити нормативну якість очищення навіть при збільшеній тривалості контакту води із завантаженням фільтра. Вже на 10-ій хвилині досліді вміст заліза у фільтрованій воді перевищує допустиму норму $0,2 \text{ мг/дм}^3$. Це остаточно доводить, що досліджувана система знезалізнення не може забезпечити якісне очищення води при заданих конструктивних і технологічних параметрах її роботи, а проблема полягає не в недостатній тривалості контакту води з фільтрувальним середовищем, а в непрацездатності самого завантаження.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ УСТАНОВКИ

Для наочного порівняння ключових параметрів проведених експериментів, їх результати зведено у табл. 1. Ефективність знезалізнення води на установці під час проведення експериментальних досліджень наведено в табл. 2 та проілюстровано на рис. 5.

Як бачимо, ефективність роботи установки упродовж часу проведення досліджень (за винятком досліді 2 на етапі 2) є досить високою і коливається в межах 75,0-95,3 %.

Табл. 1. Зведені результати експериментальних досліджень**Table 1.** Summary of experimental results

Параметр	Дослід №1	Дослід №2 (Етап 1)	Дослід №2 (Етап 2)	Дослід №3
Швидкість фільтрації, м/год	9,6	9,6	7,2	7,2
Вміст заліза у вихідній воді, мг/дм ³	1,2	1,28	1,28	1,98
Мінімальний вміст заліза у фільтрованій воді, мг/дм ³	0,16	0,06	0,42	0,17
Тривалість фільтрування до «проскоку» забруднень (>0,2 мг/дм ³), хв.	15	25	0	5
Вміст заліза у фільтрованій воді наприкінці дослідів, мг/дм ³	0,3	0,2	0,43	0,4

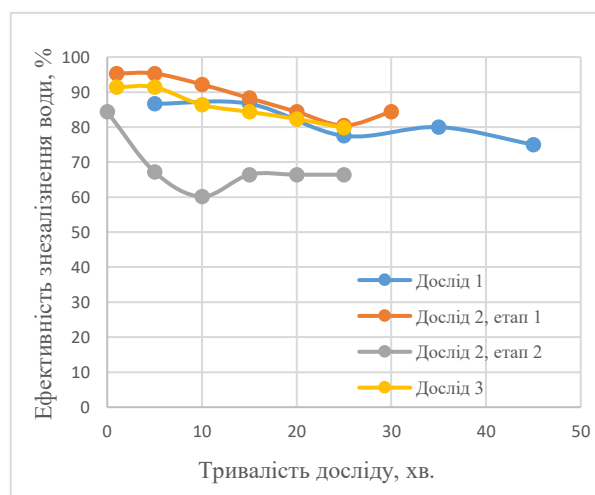
Однак тривалість її ефективної роботи дуже обмежена і для отримання води, яка б відповідала нормативним показникам якості, необхідна часта промивка і регенерація фільтра та заповнення повітряної подушки новими порціями повітря, що містить кисень, для здійснення процесів аерації та окиснення забруднень. Це призводить до збільшення експлуатаційних витрат, великих обсягів промивної води та ускладнення роботи установки загалом. Отже в поточному стані системи з даними конструктивними і технологічними параметрами забезпечити її стабільну, тривалу і ефективну роботу практично неможливо.

Аналіз експериментальних даних дозволив встановити комплекс факторів, які можуть бути причинами швидкої втрати ефективності роботи досліджуваної установки знезалізнення і погіршення якості очищеної води.

Одним з них є недостатній запас кисню в повітряній подушці, необхідний для можливості окиснення двовалентного заліза протягом тривалого часу під час здійснення аерації, що в свою чергу, уповільнює процеси коагуляції забруднень й формування пластівців з гідроксиду заліза для їх подальшого затримання в шарах засипки фільтра.

Табл. 2. Ефективність знезалізнення води на установці**Table 2.** Efficiency of water deironing at the installation

Тривалість дослідів, хв.	Ефективність знезалізнення води, %			
	Дослід 1	Дослід 2, етап 1	Дослід 2, етап 2	Дослід 3
0			84,38	
1		95,31		91,41
5	86,67	95,31	67,19	91,41
10		92,19	60,16	86,36
15	86,67	88,28	66,41	84,34
20		84,38	66,41	82,32
25	77,50	80,47	66,41	79,80
30		84,38		
35	80,00			
45	75,00			

**Рис. 5.** Ефективність знезалізнення води під час експериментальних досліджень**Fig. 5.** Efficiency of water deironing during experimental studies

Іншим чинником може бути недостатня для тривалої ефективної роботи установки кількість каталітичного завантаження з діоксиду марганцю, що входить до складу багатоконпонентного фільтра, а також ймовірність його біологічного обростання та деградації.

За даними досліджень, тривалий простій установки без роботи та належної консервації створює ідеальні умови для розвитку колоній залізобактерій, таких як *Gallionella*, *Sphaerotilus*, *Leptothrix*. Ці мікроорганізми, що природно присутні у підземних водах,

використовують розчинене двовалентне залізо як джерело енергії, окиснюючи його до тривалентної форми.

Процес біологічного обростання призводить до подвійного механізму відмови фільтра.

Першим з них є фізичне блокування, тобто колюматація. Залізобактерії продукують значну кількість позаклітинних полімерних речовин (Extracellular Polymeric Substances, EPS) – слизу, який разом з продуктами їх життєдіяльності (гідроксидом заліза) утворює на поверхні гранул завантаження щільну, гелеподібну біоплівку [9]. Ця біоплівка заповнює міжзерновий простір, різко знижуючи пористість та проникність фільтруючого шару. Це призводить до значного зростання гідравлічного опору, нерівномірного розподілу потоку води та утворення каналів [10].

Другим механізмом відмови фільтра з каталітичними властивостями є хімічна пасивація, тобто "отруєння" каталізатора. Біоплівка повністю покриває поверхню гранул фільтруючого матеріалу, фізично ізолюючи каталітично активні центри від контакту з водою. В результаті, важливий механізм знезалізнення – гетерогенне каталітичне окиснення Fe^{2+} на поверхні завантаження – стає неможливим. Каталізатор виявляється "отруєним" шаром біологічного забруднення. Таким чином, біообростання не просто "засмічує" фільтр, а фундаментально вимикає його основну хімічну функцію. Це пояснює, чому система не просто демонструє знижену продуктивність, а зазнає повної та швидкої відмови, нездатна впоратися навіть з відносно невисокими концентраціями заліза [11, 12].

Ще одним сприяючим фактором нестабільної роботи установки може бути відсутність її належного введення в експлуатацію. Багато сучасних каталітичних завантажень для знезалізнення (наприклад, DMI-65, Manganese Greensand, Birm) вимагають спеціальної процедури активації перед початком роботи [13]. Ця процедура зазвичай включає тривале (від 3 годин до доби) замочування завантаження у концентрованому

розчині сильного окисника, найчастіше гіпохлориту натрію ($NaOCl$). Мета такої активації полягає у формуванні та "дозріванні" стабільного оксидного шару на поверхні гранул, який і виконує роль каталізатора. Крім того, ця процедура дозволяє вимити з матеріалу дрібні частинки та пил, що утворилися під час транспортування [13-15].

Аналіз роботи системи керування та режиму регенерації установок з керуючими клапанами, такими як Clack Impression Plus, показав, що вони оснащені енергонезалежною пам'яттю (non-volatile memory), яка надійно зберігає всі налаштування циклів регенерації (тривалість стадій, об'єм води між регенераціями тощо) [16, 17]. Деякі моделі також мають резервний елемент живлення (батарейка або суперконденсатор) для збереження налаштувань поточного часу протягом певного періоду (від кількох годин до доби) [18, 19]. Після відновлення електропостачання єдине, що може потребувати корекції – це поточний час. Повне "скидання" всіх програмних налаштувань можливе лише у випадку серйозного апаратного збою плати керування, що є рідкісним явищем. Тому гіпотеза про можливий збій налаштувань керуючого клапана через періодичні відключення електроенергії під час роботи установки є малоюмовірною.

Більш вірогідною експлуатаційною причиною, що доповнює та посилює вищезазначені проблеми в роботі подібних установок, є неефективний режим зворотної промивки (регенерації) [20]. Цей процес є критично важливим для довготривалої та стабільної роботи будь-якого насипного фільтра. Його мета – за допомогою інтенсивного висхідного потоку води розпушити фільтруючий шар та вимити з нього накопичені за фільтроцикл забруднення. Для ефективної промивки швидкість висхідного потоку має бути достатньою для розширення шару завантаження на 20-40% [11]. Якщо параметри зворотної промивки (витрата води та тривалість) на керуючому клапані налаштовані невірно (наприклад, занижені з метою економії води), то промивка буде неповною. У фільтрах з каталітичними властивостями це

призводить до замкнутого циклу негативного впливу на матеріал:

- неповна промивка залишає у фільтруючому шарі надлишкову кількість осаду $\text{Fe}(\text{OH})_3$ та біоплівки;
- накопичені забруднення слугують "затравкою" для ще більш інтенсивного біообростання під час наступних робочих циклів та періодів простою.

В результаті цього відбувається прогресуюча деградація завантаження. З кожним циклом ступінь забруднення зростає, що призводить до ущільнення фільтруючого матеріалу, утворення конгломератів ("mudballs") та подальшого зниження ефективності наступних промивок [12]. Зрештою, система досягає стану, коли фільтруючий шар стає настільки заблокованим, що ані процес фільтрації, ані процес регенерації не можуть протікати належним чином.

ВИСНОВКИ

На основі експериментального дослідження встановлено, що установка безреагентного знезалізнєння "Formula Vody IRON CLEAR" в її поточному технічному стані при заданих параметрах не забезпечує стабільного та якісного очищення води до нормативних показників. Спостерігається швидкий "проскок" заліза та нездатність системи працювати ефективно навіть при знижених гідравлічних навантаженнях. Ймовірними причинами цього можуть бути: недостатній вміст кисню в повітряній подушці при аерації води, який швидко вичерпується; мала активність процесів коагуляції забруднень для можливості їх ефективного затримання в шарах фільтра; недостатня кількість каталітичного матеріалу у складі багатокомпонентного завантаження та його біологічне обростання з втратою каталітичних властивостей; невдало підібраний режим зворотної промивки; деградація і прогресуюча кольматація фільтра.

Для відновлення працездатності установки рекомендується здійснити хімічну дезінфекцію та інтенсивну промивку фільтруючого завантаження, а якщо ці заходи не дадуть результату через незворотну деграда-

цію, то необхідна повна заміна завантаження з дотриманням процедури його активації. На керуючому клапані потрібно забезпечити коректне налаштування параметрів циклу зворотної промивки.

Удосконалити технологію безреагентного знезалізнєння води на установці "Formula Vody IRON CLEAR" можна, використовуючи для цього:

- аераційний пристрій постійної дії замість повітряної подушки;
- біологічний метод видалення заліза за допомогою специфічних мікроорганізмів замість каталітичного очищення;
- легке плаваюче завантаження фільтра замість важких матеріалів, яким притаманна прогресуюча кольматація.

ЛІТЕРАТУРА

1. Курбанова Т., Хомуцька Т. Перспективи удосконалення технологій знезалізнєння підземних вод для локальних систем питного водопостачання // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, 2024. Вип. 48. С. 33-42. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.48.33-42>
2. Стасюк С. Р. Лабораторні дослідження процесів знезалізнєння підземних вод біологічним методом // Вісник НУБГП, 2017. Вип. 4. С. 42-51. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin>
3. Орлов В. О., Мартинов С. Ю. Аераційні методи знезалізнєння води // Вода і водоочисні технології, 2011. № 2(4). С. 42–52. URL: <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin>
4. Kvarthenko O., Sabliy L., Kovalchuk N., Lysytsya A. The use of the biological method for treating iron containing underground waters // Journal of Water and Land Development, 2018. 39 (X-XII). 77-82. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0061>
5. Sharma S. K., Petrusovski B., Schippers J. C. Biological iron removal from groundwater: a review // Aqua – Journal of Water Supply: Research and Technology, 2005. 54(4). P. 239–247. <https://doi.org/10.2166/aqua.2005.0022>
6. Tekerlekopoulou A. G., Vasiliadou I. A., Vayenas D. V. Physico-chemical and biological iron removal from potable water // Biochemical Engineering Journal, 2006. 31(1). P. 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.05.020>
7. Munter R., Ojaste H., Sutt J. Complexed iron removal from groundwater // Journal of Environmental Engineering, 2005. 131(7). P. 1014–

1020. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2005\)131:7\(1014\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2005)131:7(1014))

8. **Rozainy Z. M. R., Jamil R., Adlan M. N.** A review of removal iron and manganese by using cascade aeration systems // *Jurnal Teknologi*. 2015. 74(11). 69-76. <https://doi.org/10.11113/jt.v74.4875>

9. **Хомутецька Т., Хоружий В., Андреев В., Нор В.** Очистка природних і доочищення стічних вод на гідроавтоматичній установці в локальних водопроводах // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, 2019. Вип. 32. С. 51–58. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2019.32.51-58>

10. **Flemming H. C.** Biofouling in water systems—cases, causes and countermeasures // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2002. 59(6). P. 629–640. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1066-9>

11. **Minnesota** Department of Health. Getting the Most out of Your Filter Media. URL: <https://www.health.state.mn.us/communities/environment/water/docs/factsheet/filters.pdf>

12. **Washington** State Department of Health. Surface Water Treatment. Filter Backwash Fact Sheet. Publication 331-624. 2022. URL: <https://doh.wa.gov/community-and-environment/drinking-water/source-water/surface-water-treatment>

13. **Trus I., Halysh V., Gomelya M., Radovenchuk V.** Water deironing through the reagent and biosorption treatment and utilization of iron-rich sediments and biosornets in cement production // *Chemistry and Ecology*, 2024. 1–12. <https://doi.org/10.1080/02757540.2024.2396824>

14. **Neag E., Török A. I., Tanaselia C., Aschilean I., Senila M.** Kinetics and equilibrium studies for the removal of Mn and Fe from binary metal solution systems using a Romanian thermally activated natural zeolite // *Water*, 2020. 12 (6). 1614. <https://doi.org/10.3390/w12061614>

15. **Квартенко О., Присяжнюк І.** Моделювання процесу біологічного знезалізнення підземних вод в контактному завантаженні біореакторів // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, 2022. Вип. 41. С. 19-30. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.41.19-30>

16. **Компактний фільтр знезалізнення та пом'якшення води Ecosoft FK0835CABDVMIXA (FK0835CABDVMIXA)** – Теплотека. URL: <https://teploteka.com.ua/fk0835cabdvmixa>

17. **What happens** to my water treatment system if there is a power outage? / Alfiltra. URL: [https://www.alfiltra.com/connection-setting/what-](https://www.alfiltra.com/connection-setting/what-happens-to-my-water-treatment-system-in-a-power-outage)

[happens-to-my-water-treatment-system-in-a-power-outage](https://www.alfiltra.com/connection-setting/what-happens-to-my-water-treatment-system-in-a-power-outage)

18. **Посібник** з налаштування та експлуатації клапанів керування для систем / ECOSOFT. URL:

<https://ecosoft.ua/upload/iblock/54a/instructci.pdf>

19. **Trouble Shooting Guide for WS1-WS2 Control Valves** / Urbans Aqua. URL: https://www.urbansaqua.com/wp-content/uploads/2017/09/Clack_Trouble-Shooting-Guide-for-WS1-WS2-Control-Valves.pdf

20. **WS1-OEM-MANUAL-SOFTENER**. Aspen Water Solutions Water. URL: <https://aspenwatersolutions.com/wp-content/uploads/2019/05/WS1-OEM-MANUAL-SOFTENER.pdf>

REFERENCES

1. **Kurbanova, T., & Khomutetska, T. (2024).** Perspectives for improving deironing technologies groundwater for local drinking systems. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (48), 33–42. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2024.48.33-42>

2. **Stasiuk, S. R. (2017).** Laboratory studies of processes of groundwater de-ironing by biological methods. *Bulletin of the National University of Water Management and Nature Management. Technical sciences*. (4). 42–51. Retrieved from <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin>

3. **Orlov, V. O., & Martynov, S. Yu. (2011).** Aeration methods of iron removal of water. *Water and water treatment technologies*, 2(4), 42–52. Retrieved from <http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin>

4. **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(X-XII). 77–82. <https://doi.org/10.2478/jwld-2018-0061>

5. **Sharma, S. K., Petruskevski, B., & Schippers, J. C. (2005).** Biological iron removal from groundwater: a review. *Aqua – Journal of Water Supply: Research and Technology*, 54(4). 239–247. <https://doi.org/10.2166/aqua.2005.0022>

6. **Tekerlekopoulou, A. G., Vasiliadou, I. A., & Vayenas, D. V. (2006).** Physico-chemical and biological iron removal from potable water. *Biochemical Engineering Journal*, 31 (1), 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2006.05.020>

7. **Munter, R., Ojaste, H., Sutt, J. (2005).** Complexed iron removal from groundwater. *Journal of Environmental Engineering*, 131(7).

1014–1020. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(2005\)131:7\(1014\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(2005)131:7(1014))

8. **Rozainy, Z. M. R., Jamil, R., & Adlan, M. N. (2015).** A review of removal iron and manganese by using cascade aeration systems. *Journal Teknologi*. 74(11). 69-76. <https://doi.org/10.11113/jt.v74.4875>

9. **Khomutetska, T., Khoruzhy, V., Andreev, V., & Nor, V. (2019).** Purification of natural and waste water using a hydro-automatic plant in local water supply systems. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (32), 51–58. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2019.32.51-58>

10. **Flemming, H. C. (2002).** Biofouling in water systems—cases, causes and countermeasures. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 59(6). 629–640. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1066-9>

11. **Minnesota Department of Health (2020).** Getting the Most out of Your Filter Media. Retrieved from <https://www.health.state.mn.us/communities/environment/water/docs/factsheet/filters.pdf>

12. **Washington State Department of Health (2022).** Surface Water Treatment. Filter Backwash Fact Sheet. Publication 331-624. Retrieved from <https://doh.wa.gov/community-and-environment/drinking-water/source-water/surface-water-treatment>

13. **Trus, I., Halysh, V., Gomelya, M., & Radovenchuk, V. (2024).** Water deironing through the reagent and biosorption treatment and utilization of iron-rich sediments and biosorbents in cement production. *Chemistry and Ecology*, 1–12. <https://doi.org/10.1080/02757540.2024.2396824>

14. **Neag, E., Török, A. I., Tanaselia, C., Aschilean, I., & Senila, M. (2020).** Kinetics and equilibrium studies for the removal of Mn and Fe from binary metal solution systems using a Romanian thermally activated natural zeolite. *Water*, 12(6), 1614. <https://doi.org/10.3390/w12061614>

15. **Kvartenko, O., & Prysiashniuk, I. (2022).** Modeling the process of biological deferrization of underground waters in contact loading of bioreactor. *Problems of Water supply, Sewerage and Hydraulic*, (41). 19-30. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2022.41.19-30>

16. **Teploteka.** Compact water softening and de-ironing filter Ecosoft FK0835CABDVMIXA (FK0835CABDVMIXA) Retrieved from <https://teploteka.com.ua/fk0835cabdvmixa>

17. **Alfiltra (2024).** What happens to my water treatment system if there is a power outage? Retrieved from <https://www.alfiltra.com/connection-setting/what-happens-to-my-water-treatment-system-in-a-power-outage>

18. **ECOSOFT.** Manual for setting up and operating control valves for systems. Retrieved from <https://ecosoft.ua/upload/iblock/54a/instructci.pdf>

19. **Urbans Aqua (2009).** Trouble Shooting Guide for WS1-WS2 Control Valves. Retrieved from https://www.urbansqua.com/wp-content/uploads/2017/09/Clack_Trouble-Shooting-Guide-for-WS1-WS2-Control-Valves.pdf

20. **Aspen Water Solutions (2009).** WS1-OEM-MANUAL-SOFTENER. Retrieved from <https://aspenwatersolutions.com/wp-content/uploads/2019/05/WS1-OEM-MANUAL-SOFTENER.pdf>

Research on reagent-free water deironing in a treatment plant with multi-component loading and automatic control of operating modes

Tetiana Kurbanova, Tetiana Khomutetska

Abstract. The article presents the results of an experimental study of the efficiency of the reagent-free water deironing treatment plant "Formula Vody IRON CLEAR", which operates on the principle of aeration using an air cushion and filtration through a heavy load, which is a multi-component mixture of materials, including those with catalytic properties. The relevance of the work is due to the spread of the problem of increased iron content in underground water supply sources in Ukraine and the need to implement reliable and cost-effective technologies for local systems. To experimentally assess the efficiency of the plant, three series of experiments were conducted using model solutions that simulate water with different initial iron concentrations, at different hydraulic modes (with filtration rates of 9.6 and 7.2 m/h). Analysis of the obtained research results showed that the plant with the specified operating parameters does not provide stable and long-term water purification to the regulatory indicators of DSanPiN 2.2.4-171-10 regarding iron content (no more than 0.2 mg/dm³). Already at the initial stages of operation, an unacceptable passage of iron along with the filtered water was observed, which indicates the inability of the system to work effectively even in the event of a decrease in hydraulic loads. It was established that the probable reasons for the rapid failure of the system to provide the regulatory quality of filtered water at the outlet are: insufficient oxygen content in the air cushion for a long course of the oxidation process of divalent iron dissolved in water; insufficient time for coagulation and formation of iron hydroxide flakes of sufficient size to retain them in the filter load without getting into the filtered water; insufficient amount of catalytic loading from manganese dioxide, which is part of the multi-component filter, as well as the possibility of its biological fouling; poorly selected backwashing mode with parameters insufficient for complete removal of accumulated contaminants; degradation and progressive clogging of the heavy filter load, which leads to physical blocking of pores and changes in properties. Recommendations are given for restoring the system's performance and improving the technology for removing iron from water at the treatment plant.

Key words: deironing, groundwater, reagent-free methods, catalytic filtration, air cushion, biofouling, purification efficiency, control valve.

Стаття надійшла до редакції 30.10.2025