**УДК 628.16:579.68**

**Кравченко О. В., к.т.н.** (Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», м. Київ)

# РОЛЬ МІКРООРГАНІЗМІВ ПРИ ВИДАЛЕННІ ІЗ ВОДИ ВИСОКИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАЛІЗА НА ФІЛЬТРАХ З ЦЕОЛІТОВИМ ЗАВАНТАЖЕННЯМ

**На водах свердловин з високим змістом заліза (22–25 мг/дм$^3$) показана значна роль мікроорганізмів в процесі знезалізнення на цеолітовому завантаженні.**
***Ключові слова:*** **знезалізнення, фільтрація, аератор, цеолітове завантаження, мікроорганізми, мікробне число.**

Згідно із чинними у теперішній час ДСанПіН 2.2.4–171–10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною», концентрація сполук заліза у питній воді встановлена на рівні 0,2 мг/дм$^3$. В той же час у джерелах, залучених до систем централізованого водопостачання цілого ряду населених пунктів, вміст заліза набагато вищий. Це призводить до необхідності впровадження спеціальних очисних споруд, зокрема станцій знезалізнення води.

**Відомі чисельні методи очищення води** від сполук заліза, які різняться за ступенем технологічної надійності, економічності, простоти експлуатації тощо. В природних водах залізо може знаходиться у двох або трьох валентному стані, але найменш розчинними є сполуки заліза (III). Тому для реалізації більшості технологій знезалізнення, насамперед, необхідно переведення сполук заліза у малорозчинні форми з наступним видаленням утвореної твердої фази. Сучасні методи видалення з води сполук заліза можна умовно поділити на: фізичні (мікро-, ультра- та нанофільтрація, зворотній осмос); хімічні (окиснення різними типами окисників з наступним відстоюванням та фільтруванням, суха фільтрація, іонний обмін, окиснення безпосередньо у водному пласті і т.п.) та біотехнологічні (при яких специфічні бактерії доволі швидко окислюють двовалентне залізо та сприяють ущільненню його гідроксидних сполук) [1–6].

Проте варто зазначити, що і у теперішній час проблема кондиціювання залізовмісних природних вод для цілей питного водопостачання, особливо при високих концентраціях заліза (понад 20 мг/дм$^3$), залишається надзвичайно актуальною майже для всіх регіонів України.

До найбільш поширених та зручних технологій видалення з води заліза відноситься фільтрування через шар зернистого матеріалу (фільтруючого завантаження). При виборі останнього повинні враховуватися його фізико-хімічні та технологічні властивості, вартість, доступність для промислового використання, відповідність усім технологічним, токсикологічним та санітарно-гігієнічним вимогам та ін. До таких матеріалів відноситься і природний цеоліт (кліноптилолит). Хоча цеолітові фільтри вже тривалий час використовуються у технологіях водопідготовки, процеси, що відбуваються на цеолітовому завантаженні, ще недостатньо вивчені.

Саме тому у проведених експериментах ми акцентували увагу на більш ретельному дослідженні протікання таких процесів, що дасть змогу зробити процес очищення води більш контрольованим, а в подальшому – удосконалити існуючі технології.

**Об'єктом дослідження** були проби води, відібрані із діючої свердловини населеного пункту Житомирської області. Концентрація заліза у вихідній воді становила 22-25 мг/дм$^3$.

Дослідження процесу знезалізнення проводились на лабораторній установці (рис. 1), яка складалась з аератора (1), закритої контактної ємності (2) та безнапірного фільтру (3) з цеолітовим завантаженням. В аераторі вода насичувалась киснем, потім поступала в закриту контактну ємність, де вимірювались наступні показники: концентрація розчиненого кисню, заліза (II) та загального заліза. На виході з безнапірного фільтру у воді контролювались такі параметри: концентрація розчиненого кисню та загального заліза.

**Метою роботи** є визначення ролі мікроорганізмів у процесах, які відбуваються на цеолітовому завантаженні фільтру під час фільтрування води з високим вмістом сполук заліза.

**Результати досліджень.** Процес окиснення двовалентного заліза киснем відбувається за наступною реакцією:

$$4Fe^{2+} + O_2 + 8HCO_3^- + 2H_2O \rightarrow 4Fe(OH)_3 \downarrow + 8CO_2 \uparrow.$$

На окиснення 1 мг заліза (II) теоретично потрібно 0,143 мг розчиненого у воді кисню, в реальних умовах оптимальним вважається значення 0,7-0,8 мг/мг.

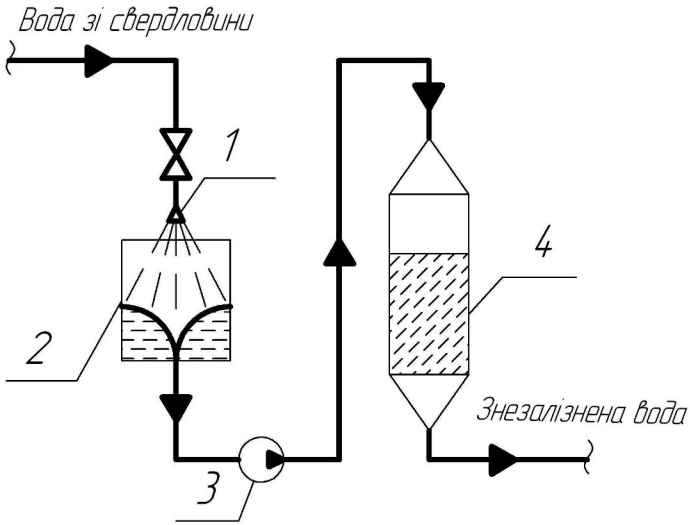


Рис. 1. Лабораторна установка для знезалізнення:
1 – аератор; 2 – контактна ємність; 3 – безнапірний фільтр

На рис. 2 показано зміну концентрації заліза на вході і виході установки при різному вмісті розчиненого кисню, зокрема 2,0–2,5 мг/дм$^3$ і 4,0–4,5 мг/дм$^3$. Швидкість фільтрування при цьому складала близько 5 м/год.

Наведений рисунок добре ілюструє вплив аерації на процес знезалізнення. Середній за фільтроцикл вміст заліза у фільтраті складав 10,7 і 8,4 мг/дм$^3$, відповідно, при концентрації розчиненого кисню 2,0–2,5 і 4,0–4,5 мг/дм$^3$.

Враховуючи, що у воді, яка поступала на фільтрування, понад 97% від загальної кількості заліза знаходилось у двовалентній формі, при аерації води відбувалось лише насичення останньої киснем. Процеси окиснення заліза при цьому практично були відсутні.

У табл. 1 наведено дані щодо зміни вмісту заліза у фільтраті.

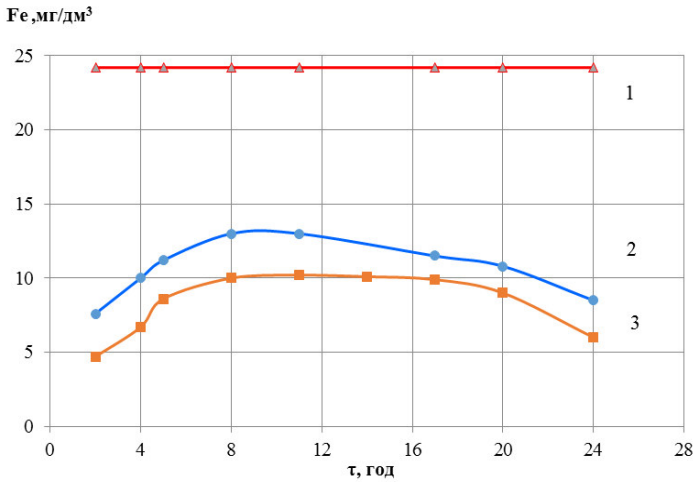


Рис. 2. Динаміка зміни вмісту заліза в фільтраті:
1 – початкова концентрація; 2 – концентрація при вмісті розчиненого кисню 2,0-2,5 мг/дм$^3$; 3 – концентрація при вмісті розчиненого кисню 4,0-4,5 мг/дм$^3$

Таблиця 1

Динаміка зміни вмісту заліза в фільтраті

| Вихідна концентрація заліза, мг/дм$^3$ | Концентрація розчиненого кисню, мг/дм$^3$ | Концентрація заліза на виході, мг/дм$^3$ | Кількість видаленого заліза, мг/дм$^3$ | Питоме окислення заліза, мг/мг |
|---|---|---|---|---|
| 24,2 | 2 | 7,6 | 16,6 | 0,12 |
| 24,2 | 2 | 8,5 | 15,6 | 0,13 |
| 24,2 | 4 | 4,7 | 19,5 | 0,21 |
| 24,2 | 4 | 6 | 18,3 | 0,22 |
| 24,2 | 2 | 10,7 | 13,5 | 0,15 |
| 24,2 | 4 | 8,4 | 15,8 | 0,25 |
| 24,2 | 1 | 12,9 | 11,3 | 0,09 |

Розрахунок відношення кількості $O_2$ до кількості окисленого заліза за експериментальними даними виявив значні відхилення не тільки від оптимального, але й від теоретичного співвідношення. В умовах досліджень для окиснення вказаної кількості заліза (II) необхідно значно більше окисника, ніж насправді витрачалось, тобто не лише кисень виступав окисником заліза.

Наступний етап експерименту включав вимірювання вмісту суль-

фатів, нітратів та амонію у воді на вході і виході з установки, і був направлений на пошук додаткового окисника. Результати аналізів наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Концентрація сульфатів, нітратів та амонію у досліджуваній воді

| Показник | Концентрація на вході, мг/дм$^3$ | Концентрація на виході, мг/дм$^3$ |
|---|---|---|
| Сульфати | 120 | 108 |
| Нітрати | 0,015 | 0,3 |
| Амоній | 1,2 | 0,6 |

Як видно з наведених даних, концентрація нітратів не зменшувалась, а навпаки зростала, отже нітрати не могли виступати окиснювачами заліза в досліджуваному процесі.

Оскільки сульфат–іони зазвичай не затримуються у фільтруючому завантаженні, їх зменшення можна пояснити наявністю у воді сульфат–редукуючих бактерій. Ці бактерії, на нашу думку, можуть сприяти окисленню заліза поряд з розчиненим киснем.

Зниження вмісту амонію, який є джерелом азоту, також додатково свідчить про життєдіяльність бактерій.

Для перевірки висунутої раніше гіпотези було проведено експерименти при швидкостях фільтрування 7 та 5 м/год (рис. 3, криві 1 і 2). При швидкості фільтрування 7 м/год крива концентрації заліза в фільтраті має максимум при значенні 13 мг/дм$^3$, а середній вміст заліза в очищеній воді за фільтроциклом складає 9,4 мг/дм$^3$. Зі зменшенням швидкості фільтрування до 5 м/год максимальне значення концентрація заліза в фільтраті дорівнює 7,2 мг/дм$^3$, а середнє знаходиться на рівні 5,7 мг/дм$^3$. В обох випадках у початкові часи фільтрування спостерігалось різке зниження ефективності процесу очищення від сполук заліза, після досягнення точки екстремуму відбувалось деяке його покращення і при подальшій роботі установки якість фільтрату практично не змінювалась.

Раніше вважалось, що низька ефективність знезалізнення на початку фільтроциклу (2–12 год) зумовлена відсутністю на поверхні зерен фільтруючого матеріалу особливої каталітичної плівки із гідроксидних сполук заліза, яка активно інтенсифікує процеси окислення і видалення з води заліза під час фільтрування. По мірі накопичення сполук заліза у фільтруючому завантаженні каталітична активність збільшується, що і призводить до підвищення ефективності всього процесу знезалізнення [7].

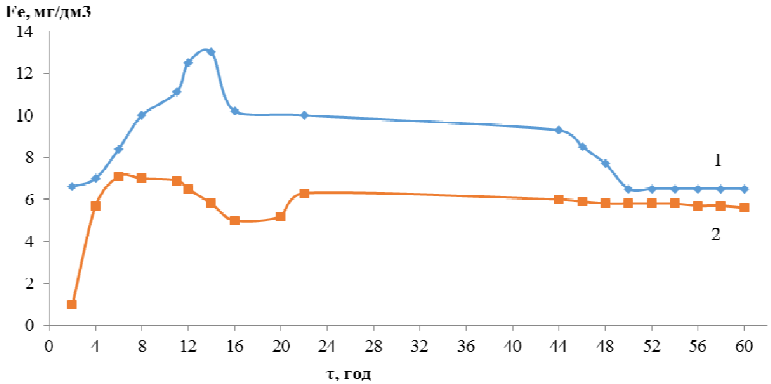


Рис. 3. Динаміка зміни вмісту заліза в фільтраті впродовж фільтроцикл при швидкостях фільтрування: 1-7 м/год; 2-5 м/год

В той же час отримані нами експериментальні дані і, зокрема, дані щодо зниження концентрації сульфатів, дозволяють інакше пояснити ці процеси. Низька ефективність очищення «чистим» фільтруючим завантаженням пов'язана не з поступовим накопиченням гідроксиду заліза, а з часом, необхідним для утворення достатньої кількості колоній мікроорганізмів, які грають значну роль у знезалізненні.

Довести або спростувати гіпотезу щодо ролі мікроорганізмів у процесі видалення сполук заліза з води можна шляхом перевірки зміни загального мікробного числа у промивній воді при промивці фільтру. Тому, на наступному етапі експериментів вимірювався саме цей показник. Відповідні результати аналізів щодо його зміни наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Зміна загального мікробного числа під час промивок фільтру в залежності від тривалості фільтроциклу

| Фільтроцикли, год | Загальне мікробне число, КУО/см$^3$ |
|---|---|
| 12 | 30 |
| 24 | 200 |
| 48 | 450 |
| 60 | 430 |

Як видно з приведених даних, загальне мікробне число зростало зі збільшенням фільтроциклу, а починаючи з фільтроциклу 48 години і

більше – стабілізувалось. Якщо порівняти ці дані з рис. 3, то приблизно такий самий час відповідав переходу до стабільно ефективного процесу очищення води від заліза. Це підтверджує, що при видаленні з води високих концентрацій сполук заліза значну роль грають саме мікроорганізми.

**Висновки.** Детально вивчено процес видалення заліза при його високих концентраціях (більше 20 мг/дм$^3$) у процесі фільтрування води на цеолітовому завантаженні фільтру.

На основі проведених експериментів показано порушення співвідношення концентрації розчиненого кисню до кількості видаленого заліза. Під час експериментів спостерігалось не тільки постійне відхилення від рекомендованого в літературі співвідношення (0,6–0,7 мг/мг), але й від його теоретичного значення – 0,143 мг/мг.

Протягом фільтроциклу встановлено зниження концентрації сульфатів, що вказує на можливу участь сульфат–редукуючих бактерій у процесі знезалізнення води.

Практично підтверджено (шляхом вимірювання протягом фільтрування загального мікробного числа) роль мікроорганізмів у процесі видалення з води сполук заліза. Стабілізація цього показника співпадала у часі із стабілізацією процесу ефективного знезалізнення.

Усі вищенаведені дані свідчать про певну роль мікроорганізмів у процесі видалення на фільтрах з цеолітовим завантаженням високих концентрацій заліза.

**1.** Николадзе Г. И. Технология очистки природных вод – М. : Высш. шк., 1987 – 479 с. **2.** Кульский Л. А. Технология очистки природных вод / Л. А. Кульский, П. П. Строкач – К. : Вища. шк., 1986 – 352 с. **3.** Николадзе Г. И. Улучшение качества подземных вод – М. : Стройиздат, 1987. – 240 с. **4.** Золотова Е. Ф. Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода / Е. Ф. Золотова, Г. Ю. Асс. – М. : Стройиздат, 1975. – 176 с. **5.** Чигаев И. Г. Современные способы обезжелезивания подземных вод с применением мембранных технологий / И. Г. Чигаев, Л. Ф. Комарова // Водоочистка. – 2014. – № 6. – С. 28–31. **6.** Хоружий П. Д. Исследование процессов и разработка технологии обезжелезивания подземных вод с помощью железобактерий / П. Д. Хоружий, Т. П. Хомутецкая, В. П. Хоружий // Химия и технология воды. – 2003. – Т. 25, № 5. – С. 465–475. **7.** Кулаков В. В. Обезжелезивание и деманганация подземных вод: Учебное пособие / В. В. Кулаков, Е. В. Сошников, Г. П. Чайковский – Хабаровск : ДВГУПС, 1998. – 100 с.

Рецензент: д.т.н., зав. відділом фізико-хімічної механіки дисперсних систем Макаров А. С. (Інститут колоїдної хімії та хімії води ім. А. В. Думанського НАН України)

**Kravchenko O. V., Candidate of Engineering** (State Enterprise "Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy", Kyiv)

**ROLE OF MICROORGANISMS IN THE PROCESS OF HIGH CONCENTRATIONS IRON REMOVAL ON FILTER WITH ZEOLITE BOOT**

**The significant role of microorganisms in the process of iron removal on zeolite boot is shown on the waters of wells with high iron content (22–25 mg/dm$^3$).**
***Keywords:*** **iron removal, filtration, aerator, zeolite boot, microorganisms, microbial count.**

---

**Кравченко А. В., к.т.н.** (Государственное предприятие «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт городского хозяйства», г. Киев)

**РОЛЬ МИКРООРГАНИЗМОВ ПРИ УДАЛЕНИИ ИЗ ВОДЫ ВЫСОКИХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЖЕЛЕЗА НА ФИЛЬТРАХ С ЦЕОЛИТОВОЙ ЗАГРУЗКОЙ**

**На водах скважин с высоким содержанием железа (22–25 мг/дм$^3$) показана значительная роль микроорганизмов в процессе обезжелезивания на цеолитовой загрузке.**
***Ключевые слова:*** **обезжелезивание, фильтрация, аэратор, цеолитовая загрузка, микроорганизмы, микробное число.**

---