

ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ВОДИ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ЗАЛІЗА АЕРУВАННЯМ ТА ФІЛЬТРУВАННЯМ

Орест Вербовський¹, Вадим Орел², Назарій Жеплінський³

Національний університет "Львівська політехніка"

12, вул С. Бандери, м. Львів, Україна, 79013

¹ канд. тех. наук, orest.v.verbovskyi@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-0410-7871

² канд. тех. наук, vadym.i.orel@lpnu.ua, orcid.org/0000-0002-3518-4597

³ nazarii.zheplinskyi.hb.2022@lpnu.ua, orcid.org/0009-0005-6760-5375

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.50.13-18

Анотація. Однією з найважливіших умов життя людини є вживання чистої питної води. Підвищений вміст заліза у воді надає їй бурий колір, неприємний металевий присмак, викликає обростання водопровідних мереж і арматури. Тому воду з підвищеним вмістом заліза необхідно знезалізнювати. Знезалізнення природних вод проводять традиційними та біологічними методами, а також методами на основі мембранних та нанотехнологій. Доступні різні технології для забезпечення безпечною питною водою, але вони є або витратними, або непридатними для використання без електроенергії. Отже, відповідна технологія повинна використовувати недорогі матеріали, які легкодоступні та відповідають або перевищують можливості традиційних технологій очищення води. Досліджували знезалізнення води з підвищеним вмістом заліза. Усі значення концентрації заліза при різних початкових концентраціях зведено до єдиної узагальненої безрозмірної залежності, яка описує зменшення у воді відносної концентрації заліза у часі. При цьому відносний час записано через час зниження концентрації заліза вдвічі. Для модельних водних розчинів з початковими концентраціями заліза 0,66; 1,0; 3,0 мг/дм³ отримано безрозмірну константу швидкості зниження концентрації заліза 0,732. Порівняння з даними інших дослідників підтверджує отриманий результат.

Ключові слова: знезалізнення води, питна вода, підвищений вміст заліза, аерування, фільтрування

ВСТУП

Однією з найважливіших умов життя людини є вживання чистої питної води. Показники якості питної води в Україні регламентує ДСанПіН 2.2.4-171-10 "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною".

У 2023 році в Україні використання підземних вод на питні потреби становило 812,412 тис. м³/добу [1]. Загальні прогнозні ресурси прісних підземних вод у Львівській області становлять 3644 тис. м³/добу [2]. У деяких регіонах підземні води є основним джерелом питної води. Підвищений вміст заліза у воді надає їй бурий колір, неприємний металевий присмак, викликає обростання водопровідних мереж і арматури.

Відсутність належного джерела водопостачання або вживання неякісної питної води згодом призводять до проблем зі здоров'ям людини. Тому воду з підвищеним вмістом заліза необхідно знезалізнювати.

Нині близько 90% сільського населення використовує воду підземних горизонтів, особливо в північних, західних та північно-східних регіонах України. Освоєння прогнозних ресурсів підземних вод цих регіонах становить всього 13%, тобто існує велика перспектива їх широкого використання для систем сільськогосподарського водопостачання [3].

Принцип більшості методів знезалізнення води полягає в тому, що спочатку розчинене залізо перетворюють на нерозчинені сполуки, які можна видалити

одноступеневим або двоступеневим розділенням. Окислення та гідроліз цих сполук здійснюють з урахуванням властивостей води та типу відповідного обладнання.

Згідно з [4], знезалізнення природних вод проводять такими методи (рис.1).

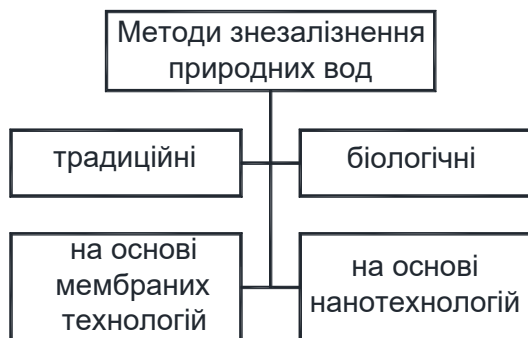


Рис. 1. Класифікація методів знезалізнення природних вод

Fig. 1. Classification of iron removal methods of natural water

До традиційних методів належать реагентні та безреагентні [5, 403], біологічні методи передбачають використання мікроорганізмів [6; 7], методи на основі мембранних технологій є з використанням різних типів мембран [8; 9; 10], методи на основі нанотехнологій – наноматеріалів або наночастинок, тобто об'єктів розміром менше 100 нм [4; 11].

Для видалення заліза із води застосовують реагентні і безреагентні методи. До реагентних методів відносять такі: спрощена аерація, обробка води сильними окислювачами та фільтрування; напірна флотація з вапнуванням і наступним фільтруванням; вапнування, відстоювання в тонкошаровому відстійнику і фільтрування; фільтрування через модифіковане завантаження; електрокоагуляція; катіонування. На даний час застосовують такі безреагентні методи знезалізнення води: спрощена аерація і фільтрування; вакуумно-ежекційна аерація і фільтрування; "суха фільтрація"; фільтрування на каркасних фільтрах; фільтрування на каркасних фільтрах; фільтрування в підземних умовах з попередньою подачею у пласт окисленої води або повітря; аерація і двоступеневе фільтрування [5, 403].

Доступні різні технології для забезпечення безпечною питною водою, але вони є

або витратними, або непридатними для використання без електроенергії. Отже, відповідна технологія повинна використовувати недорогі матеріали, які легкодоступні та відповідають або перевищують можливості традиційних технологій очищення води [12].

МЕТА І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної роботи є лабораторне дослідження процесу знезалізнення водних розчинів, які моделюють підземні води з підвищеним вмістом заліза. Використовували емпіричні методи дослідження.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

Лабораторний стенд та методику дослідження детально описано в [13]. Коротко наведемо цю методику.

Досліджувану воду насичували киснем повітря та подавали на піщаний фільтр із завантаженням у вигляді кварцового піску. Концентрацію заліза у розчині визначали з використанням фотоелектрокалориметра ФЕК-3. Реакцію середовища вимірювали за допомогою універсального іоніметра ЕВ-74.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Для води з підвищеним вмістом заліза за [13; 14] зменшення в часі концентрації заліза описується простою експонентою

$$C = C_0 \cdot \exp(-k \cdot t), \quad (1)$$

що є розв'язком диференційного рівняння реакції першого порядку:

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C, \quad (2)$$

де C , C_0 – концентрації заліза відповідно в довільний момент часу t та початкова, перед аеруванням з наступним фільтруванням, при $t_0 = 0$, мг/дм³; k – константа швидкості зниження концентрації заліза, хв⁻¹.

При цьому підвищення початкової концентрації заліза у воді від 0,66 мг/дм³ до 3,0 мг/дм³ призводило до збільшення константи швидкості зниження концентрації заліза з 0,037 хв⁻¹ до 0,149 хв⁻¹. Цю залежність (рис. 2) можна описати формулою ($R^2 = 0,9809$):

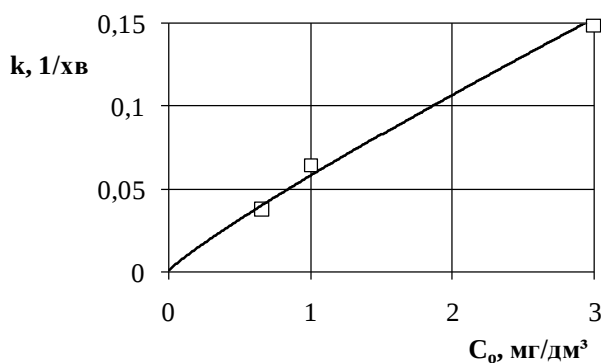


Рис. 2. Залежність константи швидкості зниження концентрації заліза від її початкової концентрації

Fig. 2. Dependence of the rate constant of iron concentration decreasing on iron concentration before the iron removal

$$k = 0,058 \cdot C_0^{0,888}. \quad (3)$$

Мінімальний ефект знезалізнєння, %, (табл. 1) для води можна оцінити за формулою [15, с.123]:

$$E \left(1 - \frac{0,2}{C_0} \right)_{min}, \quad (4)$$

де 0,2 – максимальний граничний вміст заліза у питній воді, мг/дм³, згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10.

Табл. 1. Мінімальний ефект знезалізнєння води
Table 1. Minimal effect of iron removal of water

№ з/п	Концентрація заліза у вихідній воді C_0 , мг/дм³	Література	Мінімальний ефект знезалізнєння E_{min} , %
1.	0,66	[14]	69,7
2.	1,0	[13]	80,0
3.	3,0	[13]	93,3

Дійсний ефект знезалізнєння, %, для води (табл. 2) обчислювали за формулою:

$$E = \left(1 - \frac{C_{t,min}}{C_0} \right), \quad (5)$$

де $C_{t,min}$ – концентрації заліза в момент часу, який відповідає дійсному найменшому значенню C . До того ж, максимально можливий ефект знезалізнєння, %:

Табл. 2. Дійсний ефект знезалізнєння води
Table 2. Actual effect of iron removal of water

№ з/п	Концентрація заліза у воді, мг/дм³		рН вихідної води	Дійсний ефект знезалізнєння E_{max} , %
	C_0	$C_{t,min}$		
1.	0,66	0,317	7,4	52,0
2.	1,0	0,045	7,1	95,5
3.	3,0	0,024	7,1	99,6

$$E \left(1 - \frac{C_{min}}{C_0} \right)_{max}, \quad (6)$$

де C_{min} – асимптотична, мінімально досяжна концентрація заліза, мг/дм³; при цьому $C_{t,min} \rightarrow C_{min}$.

Всі значення концентрації заліза при різних початкових концентраціях зводяться до єдиної узагальненої безрозмірної залежності, якщо перейти від абсолютного часу знезалізнєння t до відносного часу $t/t_{C_0/2}$, де $t_{C_0/2}$ – час зниження концентрації заліза вдвічі (рис. 3).

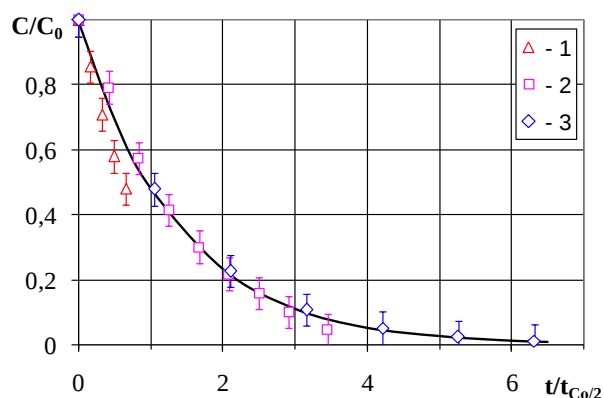


Рис. 3. Узагальнена безрозмірна кінетика зменшення концентрації заліза у воді після знезалізнєння залежно від відносного часу за початкової концентрації заліза C_0 , мг/дм³: 1 – 0,66 [14]; 2 – 1,0 [13]; 3 – 3,0 [13] (вказані відхилення $\pm 0,05$)

Fig. 3. Generalized dimensionless kinetics of iron concentration decreasing in water after iron removal depending on the relative time at the iron concentration before the iron removal C_0 , mg/dm³: 1 – 0.66 [14]; 2 – 1.0 [13]; 3 – 3.0 [13] (deviations ± 0.05 are specified)

Узагальнена безрозмірна кінетика зменшення концентрації заліза в результаті обробки даних [13; 14] ($R^2 = 0,982$)

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left(-0,732 \cdot \frac{t}{t_{C_0/2}}\right). \quad (5)$$

Отже, для води з початковими концентраціями заліза $C_0 = 0,66; 1,0; 3,0$ мг/дм³ безрозмірна константа швидкості зниження концентрації заліза $k' = 0,732$.

Порівняймо отримані результати з іншими, для яких також використовували кінетику першого порядку для знезалізнєння води в результаті аерування з подальшим фільтруванням (рис. 4). Так, у [16] досліджено воду з початковою концентрацією заліза $C_0 = 10$ мг/дм³.

Узагальнена безрозмірна залежність $C/C_0 = f(t/t_{C_0/2})$ дозволяє звести разом результати зміни концентрації заліза у воді, отриманих різними дослідниками, незалежно від їх початкового значення.

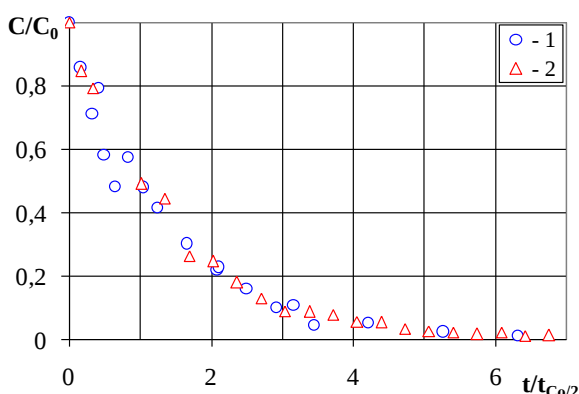


Рис. 4. Узагальнена безрозмірна кінетика зменшення концентрації заліза у воді після знезалізнєння залежно від відносного часу: 1 – дані [13; 14]; 2 – дані [16]

Fig. 4. Generalized dimensionless kinetics of iron concentration decreasing in water after iron removal depending on the relative time: 1 – data of [13; 14]; 2 – data of [16]

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Представлено результати знезалізнєння води таким безреагентним методом, як аерація з подальшим фільтруванням, за зменшення в часі концентрації заліза, що описується простою експонентою.

Усі значення концентрації заліза при різних початкових концентраціях зведено до єдиної узагальненої безрозмірної залежності, яка описує зменшення у воді відносної концентрації заліза у часі. При цьому відносний час записано через час зниження концентрації заліза вдвічі.

У подальшому варто дослідити ефективність знезалізнєння природної води.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Національна доповідь** про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 році. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2024. 438 с. URL: <https://surl.li/kbkjmt>
2. **Іванов Є.** Підземні води // Львівська область: природні умови та ресурси: монографія / за заг. ред. М. М. Назарука. Львів: Видавництво Старого Лева, 2018. С. 224–229. URL: <https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2020/09/Roslynnyy-pokryv-L-vivs-ka-oblast-2018.pdf>
3. **Стасюк С. Р.** Удосконалення технологій знезалізнєння підземних вод у системах сільгоспводопостачання: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02. Київ : Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України, 2021. 23 с. URL: <https://uacademic.info/ua/document/0421U102352> (дата звернення: 03.06.2025).
4. **Khatri N., Tyagi S., Rawtani D.** Recent strategies for the removal of iron from water: A review // Journal of Water Process Engineering, 2017. 19, 291–304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.08.015>
5. **Хоружий П. Д., Хомуцька Т. П., Хоружий В. П.** Ресурсозберігаючі технології водопостачання. К. : Аграрна наука, 2008. 534 с.
6. **Sharma, S. K., Petrusevski, B., Schippers, J. C.** Biological iron removal from groundwater: a review // Journal of Water Supply: Research and Technology–AQUA, 2005. 54(4), 239–247. <https://doi.org/10.2166/aqua.2005.0022>
7. **Marsidi N., Hasan H. A., Abdullah, S. R. S.** A review of biological aerated filters for iron and manganese ions removal in water treatment // Journal of Water Process Engineering, 2018. 23, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.010>
8. **Trus I., Radovenchyk I., Halysh V., Chuprinov E., Benatov D., Hlushko O., Sirenko L.** Innovative method for water deiron ions using capillary material // Journal of Ecological

Engineering, 2022. 23(3), 174–182. <https://doi.org/10.12911/22998993/145467>

9. **Kozyatnyk I.** Filtration materials for groundwater: a guide to good practice. Iwa Publishing. 2016. <https://doi.org/10.2166/9781780407005>

10. **Roy B., Roy ., Tarafdar A., Manna A. K.** Treatment of highly iron-contaminated brackish groundwater by MF, UF, and NF membranes for potable water resource production: influence of operating parameters, comparative study, membrane fouling, and machine learning modeling // *Water Supply*, 2024, 24(7), 2302–2320. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.144>

11. **Dulneva T. Y.** Water Purification from Hydroxo-Compounds of Iron by Ceramic Membranes Based on Clay Minerals // *Journal of Water Chemistry and Technology*, 2019. 41(6), 371–376. <https://doi.org/10.3103/S1063455X19060055>

12. **Chaturvedi S., Dave P. N.** Removal of iron for safe drinking water // *Desalination*, 2012. 303, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.003>

13. **Вербовський О. В., Качан Х. П., Іванів В. В.** Вплив аерації на зниження вмісту заліза у природній воді // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2011. № 697. С. 51–54. URL:

<https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/bd37eef3-ebb8-4dcd-96b9-d7622a1610e3/content>

14. **Качан Х. П., Вербовський О. В.** Вплив аерації на залишковий вміст заліза у природній воді // Третя науково-практична конференція з міжнародною участю «Вода в харчовій промисловості»: Збірник матеріалів третьої науково-практичної конференції. Одеса : ОНАХТ, 2012. С. 140–142. URL:

<https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c3d8e492-ac62-46d7-9b6e-8a78681fa0f1/content>

15. **Хомутецька Т. П.** Енергоощадне водопостачання. К. : Аграр. наука, 2016. 304 с.

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

REFERENCES

1. **Ministry of Community and Territory Development of Ukraine (2024).** National report on the quality of drinking water and the state of drinking water supply and wastewater disposal in Ukraine in 2023. Kyiv. Retrieved from <https://surl.li/kbkjmt> [in Ukrainian]

2. **Ivanov, Ye. (2018).** Groundwater. Lviv Region: *Natural Conditions and Resources:*

Monography. Lviv: The Old Lion Publishing House. [in Ukrainian]

3. **Stasiuk, S. R. (2021).** *Improvement of groundwater defferization technologies in agricultural water supply systems* Extended abstract of Doctor's of philosophy thesis, Kyiv. [in Ukrainian] Retrieved from:

<https://uacademic.info/ua/document/0421U102352> (Retrieved: June 03, 2025)

4. **Khatri, N., Tyagi, S., & Rawtani, D. (2017).** Recent strategies for the removal of iron from water: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 19, 291–304. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.08.015>

5. **Khoruzhy P. D., Khomutetska T. P., Khoruzhy V. P. (2008).** Resursozberihaiuchi tekhnologii vodopostachannia. *Ahrarna nauka*. [in Ukrainian]

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

7. **Marsidi, N., Hasan, H. A., & Abdullah, S. R. S. (2018).** A review of biological aerated filters for iron and manganese ions removal in water treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 23, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.010>

8. **Trus, I., Radovenchyk, I., Halysh, V., Chuprinov, E., Benatov, D., Hlushko, O., & Sirenko, L. (2022).** Innovative method for water deiron ions using capillary material. *Journal of Ecological Engineering*, 23(3), 174–182. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/145467>

9. **Kozyatnyk, I. (2016).** Filtration materials for groundwater: a guide to good practice. Iwa Publishing. <https://doi.org/10.2166/9781780407005>

10. **Roy, B., Roy, D., Tarafdar, A., & Manna, A. K. (2024).** Treatment of highly iron-contaminated brackish groundwater by MF, UF, and NF membranes for potable water resource production: influence of operating parameters, comparative study, membrane fouling, and machine learning modeling. *Water Supply*, 24(7), 2302–2320. <https://doi.org/10.2166/ws.2024.144>

11. **Dulneva, T. Y. (2019).** Water Purification from Hydroxo-Compounds of Iron by Ceramic Membranes Based on Clay Minerals. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 41(6), 371–376. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1063455X19060055>

12. **Chaturvedi, S., & Dave, P. N. (2012).** Removal of iron for safe drinking water. *Desalination*, 303, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.003>

13. Verbovskii, O. V., Kachan Kh. P., & Ivaniv V. V. (2011). Vplyv aeratsii na znyzhennia vmistu zaliza u pryrodni vod. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Serii: Teoriia i praktyka budivnytstva*, 697. 51–54. [in Ukrainian] Retrieved from <https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/bd37eef3-ebb8-4dcd-96b9-d7622a1610e3/content> (Retrieved: June 03, 2025)
14. Kachan Kh. P., & Verbovskii, O. V. (2012). Vplyv aeratsii na zalyshkovyi vmist zaliza u pryrodni vod. Tretia naukovo-praktychna konferentsiia z mizhnarodnoiu uchastiu «Voda v kharchovii promyslovosti»: Zbirnyk materialiv tretoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Odesa: ONAKhT. 140–142. [in Ukrainian] URL: <https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c3d8e492-ac62-46d7-9b6e-8a78681fa0f1/content> (Retrieved: June 03, 2025)
15. Khomutetska T. P. (2016). Enerhooshchadne vodopostachannia. *Ahrar. nauka*. [in Ukrainian]
16. 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>

Iron removal of water with high iron content by aeration and filtration

Orest Verbovskiy, Vadym Orel, Nazarii Zheplinskyi

Abstract. One of the most important conditions for human life is the use of clean drinking water. Elevated iron content in water gives it a brown color, an unpleasant metallic taste, and causes contamination of water supply networks and fittings. Therefore, water with a high iron content must iron removal. Natural water is disinfected using traditional and biological methods, as well as methods based on membrane and nanotechnologies. There are various technologies for providing safe drinking water, but they are either expensive or cannot be used without electricity. Therefore, a suitable technology should use inexpensive materials that are readily available and meet or exceed the capabilities of traditional water purification technologies. The process of iron removal of water with a high iron content was investigated. All iron deficiency values at different initial concentrations were reduced to a single generalized dimensionless dependence describing the decrease in the relative concentration of iron in water over time. In this case, the relative time is recorded as the time until the iron concentration is reduced by half. For model aqueous solutions with initial iron concentrations of 0.66, 1.0, and 3.0 mg/dm³, a dimensionless constant of 0.732 was obtained for the rate of decrease in iron concentration. Comparison with data from other researchers confirms the result obtained.

Key words: iron removal from water, drinking water, iron removal of water, aeration, filtration

Стаття надійшла до редакції 11.06.2025