

УДК 628.1

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ФІЗИКО-ХІМІЧНИМ МЕТОДОМ*

С.Р. СТАСЮК

Інститут водних проблем і меліорації НААН

Представлено результати лабораторних досліджень процесів знезалізнення підземних вод при їх спрощеній аерації та висхідному фільтруванні через плаваюче пінополістирольне завантаження. Встановлено закономірності зміни вмісту заліза у фільтрованій воді протягом фільтроциклу при різних швидкостях фільтрування води та розроблено рекомендації для оптимальних режимів експлуатації водознезалізнювальних установок.

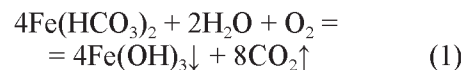
Ключові слова: підземні води, знезалізнення води, спрощена аерація води, пінополістирольне завантаження, висхідне фільтрування води, брудомісткість фільтра, тривалість фільтроциклу, інтенсивність і тривалість промивки

Вступ. Основним джерелом сільсько-господарського водопостачання в Україні є підземні води, які дуже часто характеризуються підвищеним вмістом заліза. Для вирішення проблеми понаднормового вмісту заліза у підземних водах, що використовуються як джерела водопостачання, у різні часи представниками багатьох наукових шкіл було проведено великий обсяг експериментальних та теоретичних досліджень, розроблено різноманітні технологічні схеми та методи розрахунку споруд для знезалізнення води.

Ключову роль у практиці знезалізнення води відіграють фізико-хімічні перетворення заліза, оскільки вони безпосередньо відповідають за його видалення [8,9]. Для видалення заліза із води застосовують реагентні і безреагентні методи. Вибір методу залежить від кількості і форми існування заліза, якісного складу води та продуктивності водоочисної станції [5]. В ІВПіМ НААН розроблена і запатентована установка для знезалізнення і зм'якшення води [6,7], на якій можна очищати воду від домішок, які найчастіше зустрічаються у підземних водах реагентним або безреагентним методами.

Нині для видалення заліза з води застосовують переважно безреагентні методи шляхом спрощеної її аерації та фільтрування [5]. Для спрощеної аерації збагачення води киснем забезпечується при падінні крапель з висоти 0,5 м. При цьому концентрація розчинного у воді кисню доходить до 5 мг/дм³ [2]. Для окиснення 1 мг заліза необхідно 0,143 мг кисню [1,2]. Розбрикування здійснюють, використовуючи дірчасті лотки або труби з отворами, через які вода витікає із швидкістю $V_{\text{отв}}=1,5-2$ м/с [6,7].

При аерації води відбувається окиснення двовалентного заліза з переводом його у тривалентну форму і утворенням малорозчинного гідроксиду заліза $\text{Fe}(\text{OH})_3$, що випадає в осад, та вуглекислого газу CO_2 , який видаляється з води:



Окиснення заліза можна здійснювати двома методами [5]:

- фізико-хімічним, при якому реакція (1) відбувається безпосередньо у водоповітряному баку;

- біологічним, при якому специфічні залізобактерії швидко окиснюють двовалентне залізо, споживаючи енергію окиснення для своєї життєдіяльності, а продукти окиснення $\text{Fe}(\text{OH})_3$ компактно ущільнюються.

Задачі лабораторних досліджень. У роботі досліджували процеси знезалізнення підземних вод фізико-хімічним методом з метою встановлення закономірностей зміни вмісту заліза у фільтрованій воді протягом фільтроциклу при різних швидкостях її фільтрування та розробки рекомендацій з оптимальних режимів роботи водознезалізнювальних установок.

Дослідження виконували на лабораторній установці, технологічна схема якої представлена на рис.1.

Принципи роботи установки детально описано в роботах [6, 7].

Методика проведення досліджень. Вимірювали вміст заліза у вихідній воді, що подавалась по трубі I, та у фільтрованій воді, що відводилась по трубі II. Вміст заліза у вихідній воді, що подавалась із водонапірної башти, змінювався протягом досліджень, постійно контролювався. Швидкість висхід-

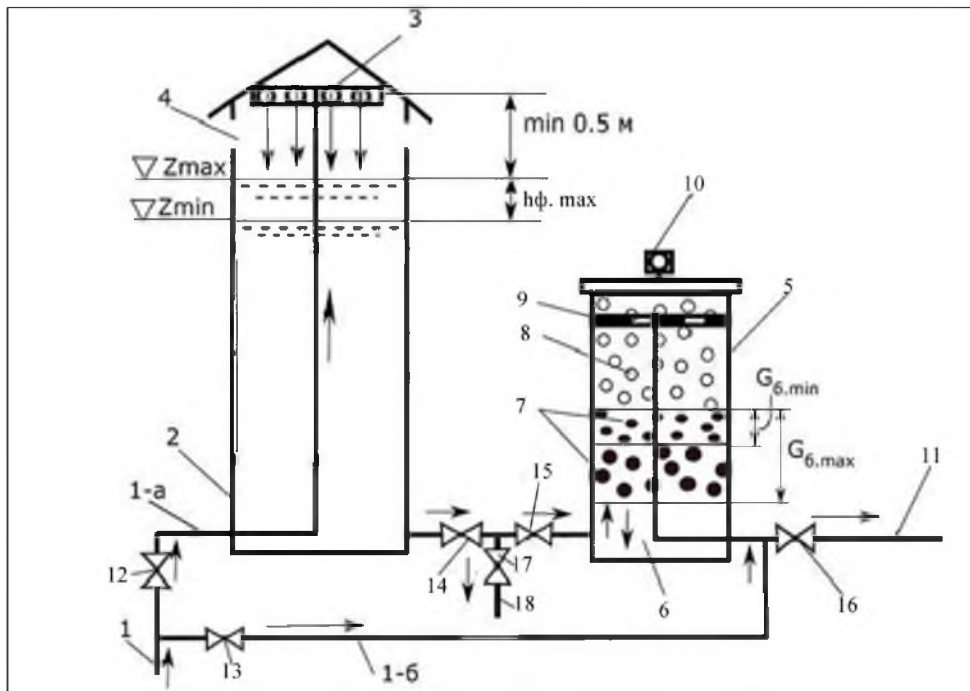


Рис. 1. Технологічна схема лабораторної установки для знезалізнення води фізико-хімічним методом:

- 1 – подача вихідної води; 1а – на очищення; 1б – на промивку фільтра;
 2 – водоповітряний бак; 3 – аератор, 4 – повітряпропускні вікна;
 5 – контактний прояснювальний фільтр (КПФ); 6 – підфільтровий простір;
 7 – осад з $Fe(OH)_3$; 8 – пінополістирольне плаваюче завантаження;
 9 – ковпачковий дренаж; 10 – вантуз; 11 – відведення очищеної води;
 12-17 – засувки; 18 – скидання промивної води

ного фільтрування води на КПФ визначали за формулою:

$$V_{\phi} = Q / \omega, \text{ м/год} \quad (2)$$

де Q – витрата води, $\text{м}^3/\text{год}$; ω – площа поперечного перерізу КПФ внутрішнім діаметром $d_{\phi}=144$ мм.

Дослідження виконували при трьох постійних протягом фільтроциклу швидкостях фільтрування води V_{ϕ} : 7; 9 і 11 м/год.

Протягом фільтроциклу накопичувався осад з $Fe(OH)_3$ у підфільтровому просторі, що збільшувало гідралічний опір рухові води на величину h_{max} та підвищувало рівень води у водоповітряному баку з відмітки Z_{min} (на початку фільтроциклу) до величини Z_{max} (у кінці фільтроциклу).

Питому брудомісткість КПФ в k -ий момент часу протягом фільтроциклу визначали за формулою:

$$G_k = 0,001 K_n V_{\phi} \sum_0^{T_{\phi,k}} (C_{o,i} - C_{\phi,i}) T_{\phi,i}, \text{ кг/м}^2 \quad (3)$$

де K_n – перевідний коефіцієнт, що враховує співвідношення молекулярної маси

гідроксиду заліза $Fe(OH)_3$ до атомної маси двовалентного заліза

$$K_n = \frac{M[Fe(OH)_3]}{AFe^{2+}} = \frac{107}{56} = 1,91; \quad (4)$$

$C_{o,i}$ і $C_{\phi,i}$ – середній вміст заліза відповідно у вихідній та фільтрованій воді за інтервал часу між сусіднім вимірюванням $T_{\phi,i}$, г/м^3 ; $T_{\phi,k}$ – тривалість фільтрування води, год.

Максимальна тривалість фільтрування $T_{\phi,\text{max}}$ визначається часом фільтрування води, після якого фільтр необхідно виключити на промивку, оскільки якість фільтрованої води досягла гранично допустимих значень вмісту заліза $C_{\phi} = 0,2$ мг/дм^3 , що контролюється відповідними граничними втратами напору на фільтрі:

$$h_{\phi,\text{max}} = Z_{\text{max}} - Z_{\text{min}}, \text{ м} \quad (5)$$

Ефективність знезалізнення води у будь-який (k -ий) період часу залежить від множини факторів:

$$E = \frac{C_0 - C_{\phi}}{C_0} \cdot 100\% = f(d_{\phi}, K_n, H_{\phi}, TC, V_{\phi}, G_k), \quad (6)$$

де C_0 і C_{ϕ} – вміст заліза відповідно у вихідній та фільтрованій воді, мг/дм^3 ; d_{ϕ} , K_n ,

H_{ϕ} – діаметр, мм, коефіцієнт неоднорідності і товщина, м, гранул фільтрувального завантаження; Т.С – технологічна схема, що визначає спосіб аерації води та окиснення двовалентного заліза; V_{ϕ} – швидкість фільтрування води, м/год, що визначалась за формулою (2); G_k – питома брудомісткість КПФ, що визначалась за формулою (3).

Результати лабораторних досліджень.

У табл. 1-3 наведено результати досліджень та обчислень показників процесу знезалізнення води при швидкостях її висхідного фільтрування на КПФ відповідно 7; 9 і 11 м/год.

Зміна вмісту заліза у фільтрованій воді протягом фільтроциклу при $V_{\phi,1}=7$ м/год показана на рис.2.

З рис.2 бачимо, що «зарядка» фільтра при $V_{\phi}=7$ м/год становить $T_{зар}=40$ годин, а тривалість корисної роботи установки, при якій забезпечується нормативна якість фільтрованої води, дорівнює $T_{\phi,1} = 143$ години. Після 183 годин фільтрування води КПФ необхідно виключити на промивку.

Дані табл.1 та рис.3 свідчать про те, що втрати напору в чистому фільтрувальному завантаженні дорівнюють $h_{\phi,о}=55$ мм, а після $T_{зар}=40$ год $h_{\phi,мін}=150$ мм і мінімальна питома брудомісткість $G_{мін}= 0,3$ кг/м². У кінці фільтроциклу, тобто після 183 годин фільтру-

вання води $h_{\phi,мак}=410$ мм, а максимальна питома брудомісткість КПФ, при якій його необхідно виключити на промивку, дорівнює $G_{мак}=1,84$ кг/м².

На рис.3 наведено графіки зміни питомої брудомісткості фільтра $G_{п,1}=f(T_{\phi,1})$ і втрат напору $h_{\phi,1}=f(T_{\phi,1})$ у фільтрі протягом фільтроциклу при швидкості фільтрування води $V_{\phi,1}=7$ м/год.

Аналогічними є дослідження процесів знезалізнення води при висхідному її фільтруванні на КПФ зі швидкостями $V_{\phi,2}=9$ м/год і $V_{\phi,3}=11$ м/год.

Результати досліджень і розрахунків наведено в табл. 2 і 3.

Дослідження процесів знезалізнення води на лабораторній установці виконували при початковій мінімальній питомій брудомісткості КПФ для даної швидкості фільтрування води, яка приймалась: при $V_{\phi,2}=9$ м/год $G_{мін}= 0,36$ кг/м², а при $V_{\phi,3}=11$ м/год $G_{мін}= 0,52$ кг/м².

За результатами досліджень побудовані графіки $C_{\phi}=f(V_{\phi}, T_{\phi})$ (рис. 4).

З табл. 2 і 3 та рис.4 визначаємо розрахункові параметри роботи установки: $T_{\phi,2}=138$ год; $T_{\phi,3}=105$ год; $G_{мін,2}= 0,36$ кг/м²; $G_{мін,3}= 0,52$ кг/м²; $G_{мак,2}= 1,52$ кг/м²; $G_{мак,3}= 1,27$ кг/м²; $h_{\phi,мак,2}=430$ мм; $h_{\phi,мак,3}=470$ мм.

1. Результати вимірювань і обчислень показників знезалізнення води при $V_{\phi,1}=7$ м/год

Показники процесу знезалізнення води		Тривалість фільтрування води T_{ϕ} , год.							
		0	28	49	98	130	148	171	194
вміст заліза, мг/дм ³	C_o	0,83	0,91	1,14	1,2	0,8	0,9	1,15	1,12
	C_{ϕ}	0,46	0,22	0,19	0,18	0,15	0,1	0,16	0,25
питома брудомісткість G , кг/м ²		0	0,198	0,428	1,073	1,216	1,390	1,665	1,951
втрата напору h_{ϕ} , мм		55	75	185	255	280	290	370	450

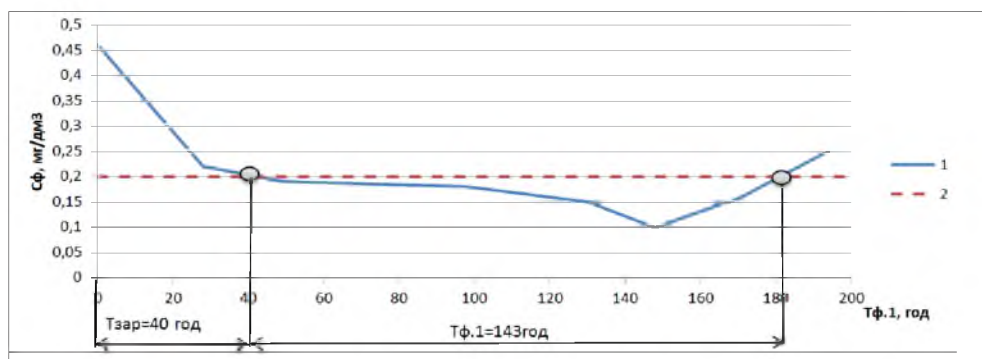


Рис. 2. Графік зміни вмісту заліза у фільтрованій воді протягом фільтроциклу при $V_{\phi,1}=7$ м/год:
 1 – вміст заліза у фільтрованій воді, мг/дм³; 2 – нормативний вміст заліза у питній воді ($C_{\phi,н} = 0,2$ мг/дм³)

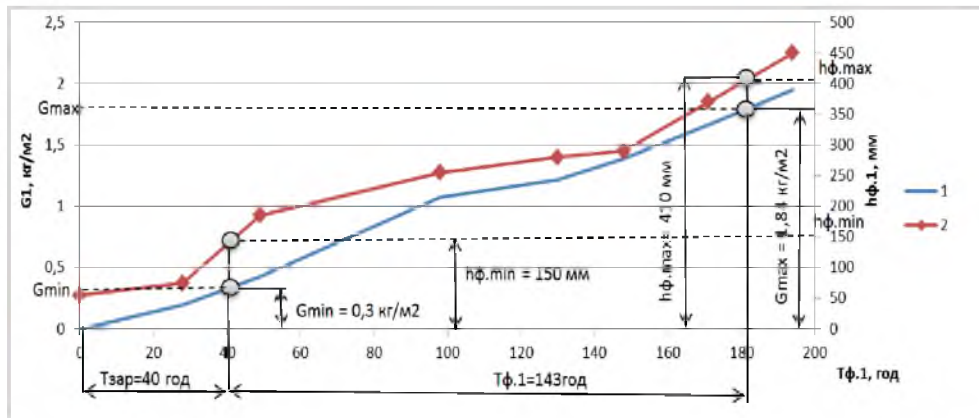


Рис. 3. Графіки зміни питомої брудомісткості фільтра $G_{n,1}=f(T_{ф,1})$ – 1 і втрат напору у фільтрі $h_{ф,1}=f(T_{ф,1})$ – 2 протягом фільтроциклу при $V_{ф,1}=7$ м/год

2. Результати вимірювань і обчислень показників знезалізнення води при $V_{ф,2}=9$ м/год

Показники процесу знезалізнення води	Тривалість фільтрування води $T_{ф,2}$, год.								
	0	23	39	63	86	122	134	155	
вміст заліза, мг/дм ³	C_o	-	3,18	1,08	0,89	1,15	1,13	1,25	1,29
	$C_{ф,2}$	-	0,104	0,101	0,108	0,12	0,1	0,167	0,37
питома брудомісткість G , кг/м ²	0,36	1,576	2,133	2,496	2,854	3,491	3,709	4,071	
втрата напору $h_{ф,2}$, мм	-	190	200	230	260	330	430	530	

3. Результати вимірювань і обчислень показників знезалізнення води при $V_{ф,3}=11$ м/год

Показники процесу знезалізнення води	Тривалість фільтрування води $T_{ф,3}$, год.						
	0	15	38	64	87	116	
вміст заліза, мг/дм ³	C_o	-	1,49	1,54	0,81	1,03	1,29
	$C_{ф,3}$	-	0,125	0,08	0,13	0,05	0,3
питома брудомісткість G , кг/м ²	0,52	0,95	1,633	2,217	2,618	3,218	
втрата напору $h_{ф,3}$, мм	-	175	280	380	420	480	

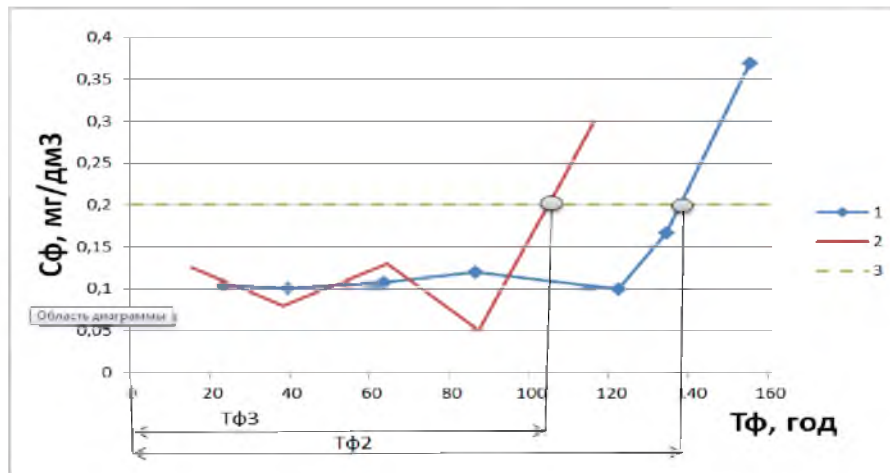


Рис. 4. Графіки залежностей $C_{ф,3}=f(V_{ф,3}, T_{ф,3})$ для швидкостей фільтрування води:
1 – $V_{ф,2}=9$ м/год; 2 – $V_{ф,3}=11$ м/год; 3 – нормативний вміст заліза у питній воді ($C_{ф,н}=0,2$ мг/дм³)

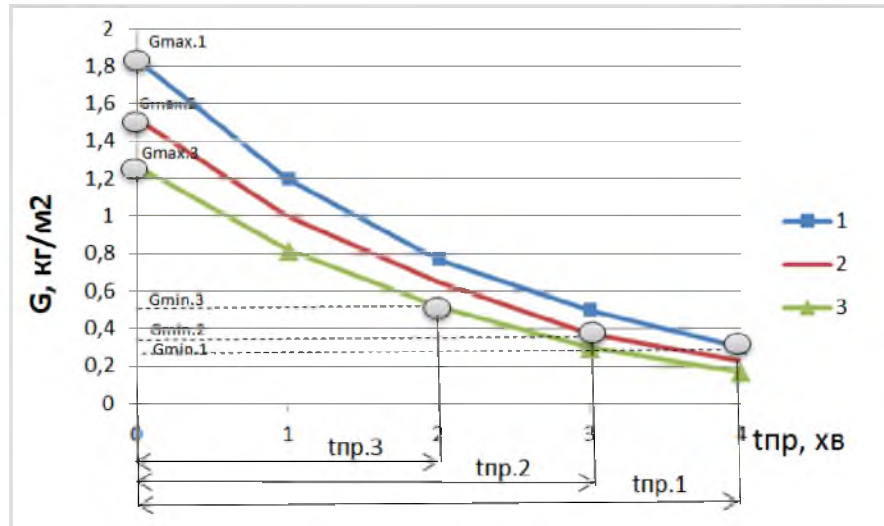


Рис. 5. Графіки виносу осаду з КПФ для швидкостей фільтрування води:

1 – $V_{\phi 1} = 7 \text{ м/год}$; 2 – $V_{\phi 2} = 9 \text{ м/год}$; 3 – $V_{\phi 3} = 11 \text{ м/год}$

Промивка фільтра. Промивку КПФ виконували подачею промивної води витратою $12 \text{ л/хв} = 0,2 \text{ л/с}$, а при внутрішньому діаметрі фільтра $d_{\phi} = 0,144 \text{ м}$ – інтенсивність промивки була:

$$q_{\text{пр.}} = \frac{4Q_{\text{пр.}}}{\pi d_{\phi}^2} = \frac{4 \cdot 0,2}{3,14 \cdot 0,144^2} = 12,3 \text{ л/с} \cdot \text{м}^2. \quad (7)$$

Промивку фільтра виконували з розрахунку, щоб після його промивки такою інтенсивністю в кінці процесу залишалась мінімальна питома брудомісткість фільтра для даної швидкості фільтрування води $G_{\text{мін.}}$.

Результати промивки КПФ показані на рис.5.

Висновки. На основі експериментальних досліджень на лабораторній установці встановлено залежності вмісту заліза у фільтрованій воді C_{ϕ} від швидкості її висхідного фільтрування та питомої брудомісткості КПФ. Розроблено рекомендації з вибору оптимальних експлуатаційних показників запропонованої установки конструкції ІВПіМ НААН для надійного забезпечення якості фільтрованої води та тривалості фільтроциклу.

Бібліографія

1. Николадзе Г.И. *Технология очистки природных вод: Учеб. для вузов – Москва: Высшая школа, 1987. – 479 с.*
2. Клячко В.А., Апельцин И.А. *Очистка природных вод – Москва: Стройиздат, 1971. – 578 с.*
3. Чернинский С.Н. *Руководство по гигиене водоснабжения – Москва: Медицина, 1975. – 327 с.*
4. ДСанПіН 2.2.4–171–10. *Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. – МОЗУ 12.05.2010, № 400. – МЮУ 01.07.2010, № 452/17747.*
5. Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П. *Ресурсозберігаючі технології водопостачання – Київ: Аграрна наука, 2008. – 534 с.*
6. Патент на корисну модель №85009. *Установка для знезалізнення і зм'якшення води / Стасюк С.Р., Хомутецька Т.П., Хоружий П.Д. – Бюл.№21, 11.11.2013 р.*
7. Стасюк С.Р., Хомутецька Т.П., Хоружий П.Д. *Розрахунок установок для знезалізнення і зм'якшення підземних вод у системах сільськогосподарського водопостачання // Меліорація і водне господарство. – 2015. – №102. – С. 20–24.*
8. Поляков В.Л., Мартинов С.Ю. *Математичне моделювання динаміки накопичення сполук заліза у вхідному перерізі завантаження фільтра – Водопостачання, водовідведення та проблеми гідраліки. – 2017. – №28. – С. 272–280.*
9. Sharma S.K. *Adsorptive Iron Removal from Groudwater: Dissertation for Degree of Doctor / Sharma S.K. – Delft, The Netherlands, 2009, 202 p.*

С.Р. Стасюк

**Лабораторные исследования процессов обезжелезивания подземных вод
физико-химическим методом**

Приведены результаты лабораторных исследований процессов обезжелезивания подземных вод при их упрощенной аэрации и восходящем фильтровании через плавающую пенополистирольную загрузку. Установлены закономерности изменения содержания железа в фильтрованной воде на протяжении фильтроцикла при разных скоростях фильтрования воды и разработаны рекомендации для оптимальных режимов эксплуатации установок обезжелезивания воды.

S.R. Stasiuk

**Laboratory studies of the processes of deironing of groundwater
by the physico-chemical method**

The results of laboratory studies are presented for the processes of iron removal from groundwater under the conditions of its simplified aeration and ascending filtering through floating polystyrene loading. The regularities of changes in the content of iron in filtered water during the filtration cycle at different rates of water filtration are established, and the recommendations for optimal modes of iron removal facilities operation are developed.