

## УДК 628.1; 631.6

Стасюк С. Р. (Інститут водних проблем і меліорації НААН, м. Київ)

### ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД БІОЛОГІЧНИМ МЕТОДОМ

**Приведені результати лабораторних досліджень процесів знезалізнання підземних вод біологічним методом на установці з біореактором і контактним прояснювальним фільтром. Встановлено закономірності зміни вмісту заліза у фільтрованій воді протягом фільтроциклу від множини факторів. Розроблено рекомендації оптимальних режимів роботи водознезалізнювальної установки.**

**Ключові слова:** знезалізнання, залізобактерії, біореактор, фільтр, окиснення, фільтрування.

**Вступ.** Під знезалізнанням води розуміють процес видалення з неї заліза, що знаходиться у формі складних органічних і мінеральних сполук [1; 2]. Згідно діючих нормативів на водопровідну воду [3] залізо належить до санітарно-хімічних показників безпечності і якості води та його концентрація не повинна перевищувати  $0,2 \text{ мг/дм}^3$ .

У переважної більшості водоносних горизонтів підземних вод України спостерігається підвищена концентрація заліза і становить в середньому  $3\text{-}5 \text{ мг/дм}^3$  [4].

Вживання води з підвищеним вмістом розчиненого в ній заліза впливає на розвиток багатьох захворювань, оскільки накопичується до токсичної концентрації в органах і тканинах, таких як суглоби, печінка, ендокринні залози, серце [5].

Методи знезалізнання води. Для видалення заліза із води застосовують реагентні і безреагентні методи [1; 2; 4]. Вибір методу знезалізнання води залежить від кількості і форми існування заліза, якісного складу води та продуктивності водоочисної станції.

Безреагентні методи знезалізнання води застосовуються [6; 7], якщо: рН вихідної води не менше 6,7; лужність не менше  $1,5 \text{ мг-екв/дм}^3$ ; перманганатна окиснюваність – не більше  $9,5 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ ; вміст тривалентного заліза  $\text{Fe}^{3+}$  – не більше 10% від загального вмісту заліза  $\text{Fe}_{\text{заг}}$ ; вміст  $\text{CO}_2 \leq 80 \text{ мг/дм}^3$  і  $\text{H}_2\text{S} \leq 2 \text{ мг/дм}^3$ .

Реагентні методи знезалізнання води застосовують при низьких значеннях рН, високій перманганатній окиснюваності та нестабільності води.

Перераховані методи знезалізнення води мають неоднакову надійність, технологічність, економічну доцільність, можливість застосування та інші показники. До складу більшості станцій (установок) знезалізнення води, які працюють у безреагентному або реагентному режимах, входять такі споруди: аераційне устаткування; обладнання для подачі стисненого повітря і знезараження води; в окремих випадках – відстійники або прояснювачі із завислим осадом; швидкі фільтри.

Безреагентні і реагентні методи є по суті фізико-хімічними методами знезалізнення води, які передбачають уведення окиснювачів  $Fe^{2+}$ . В першому методі цим окиснювачем є кисень повітря, а в другому – хімічні реагенти (хлор, озон, перманганат калію тощо).

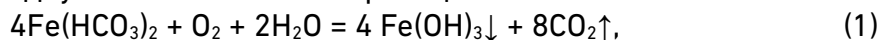
Суть знезалізнення води полягає в переведенні розчинного в ній двовуглекислого заліза  $Fe(HCO_3)_2$  в малорозчинний гідроксид заліза  $Fe(OH)_3$ , який затримується на фільтрах.

За останні роки в Німеччині та Франції широкого застосування набув біологічний метод знезалізнення води, при якому специфічні бактерії дуже швидко окиснюють двовалентне залізо  $Fe^{2+}$ , а продукти окиснення компактно ущільнюються [8; 9].

Суть біологічного метода знезалізнення води. Специфічні залізобактерії *Gallionella ferruginea* використовують енергію, що виділяється при переведенні  $Fe^{2+}$  у  $Fe^{3+}$ , для своєї життєдіяльності. Цей процес відбувається дуже швидко, осад з гідроксиду заліза  $Fe(OH)_3$  має більшу густину, що дозволяє значно збільшити швидкість фільтрування води, брудомісткість фільтра і швидкість фільтроциклу [2; 8; 9].

Для біологічного знезалізнення підземних вод необхідно виконувати такі умови:

1) насичення вихідної води киснем здійснювати у точній відповідності зі стехіометричною кількістю, необхідною для окиснення  $Fe^{2+}$ , що відбувається за хімічною реакцією:



звідки бачимо, що на окиснення 1 мг  $Fe^{2+}$  потрібно

$$\frac{[O_2]}{4[Fe^{2+}]} = \frac{32}{224} = 0,143 \text{ мг кисню}; \quad (2)$$

2) створити сприятливе середовище для закріплення у фільтрувальному завантаженні залізобактерій, використовуючи фіксовані насадки з тонких волокнистих матеріалів з поліетилену, капрону або лавсану, допущені Міністерством охорони здоров'я в системах питного водопостачання [10].

На початку роботи біореактора (БР) з волокнистим фільтрувальним завантаженням (1-й етап) відбувається насичення і закріплення залізобактерій, окиснення та видалення з води  $Fe^{2+}$ . Цей період характеризується дією сил адгезії й адсорбції з накопиченням біомаси.

На другому етапі настає фаза відмирання культури і відрив біомаси та гідроксиду заліза  $Fe(OH)_3$  з поверхні волокон під дією гідродинамічних сил фільтраційного потоку. Цей осад виноситься в підфільтровий простір контактного прояснювального фільтра (КПФ), де відбувається флокулювання мікропластівців у крупні агрегатовані пластівці, їх стиснене осідання та випадання в осад із прояснюваної води.

Лабораторні дослідження виконувались на установці, схема якої показана на рис.1. Основними елементами установки [11] є біореактор (БР) і контактний прояснювальний фільтр (КПФ).

Установка працює так. Вихідна вода по трубі 1-а подається на аератор 3, розбризкується на дрібні крапельки, які падаючи вниз з висоти не менше 0,5 м насичуються киснем повітря, що надходить в корпус БР через вікна 4, і рухається зверху вниз через волокнисте завантаження 6 із капронових ниток діаметром  $d_b=1$  мм, які закріплені в натягнутому стані між колосниковими решітками 5 з прозорами між ними 5 мм. Довжина волокон  $l_b=0,8$  м, а їх кількість становила  $n_b=155$  шт. З БР вода надходить в КПФ і рухається знизу догори. При цьому в підфільтровому просторі 8 відбувається стиснене осідання пластівців із гідроксиду заліза  $Fe(OH)_3$  з утворенням осаду 9, який виконує основну роль в проясненні води, що проходить через пінополістирольне плаваюче завантаження 10, збирається ковпачковим дренажем 11 і відводиться по трубопроводу 13. Газу, що виділяються з води, випускаються через вантуз 12.

БР має такі призначення:

- насичення вихідної води киснем повітря;
- видалення газів з води для виключення пухирцевої кольматації плаваючого фільтрувального завантаження;
- підтримання постійної швидкості фільтрування води на КПФ в умовах зростання втрат напору в ньому протягом фільтроциклу.

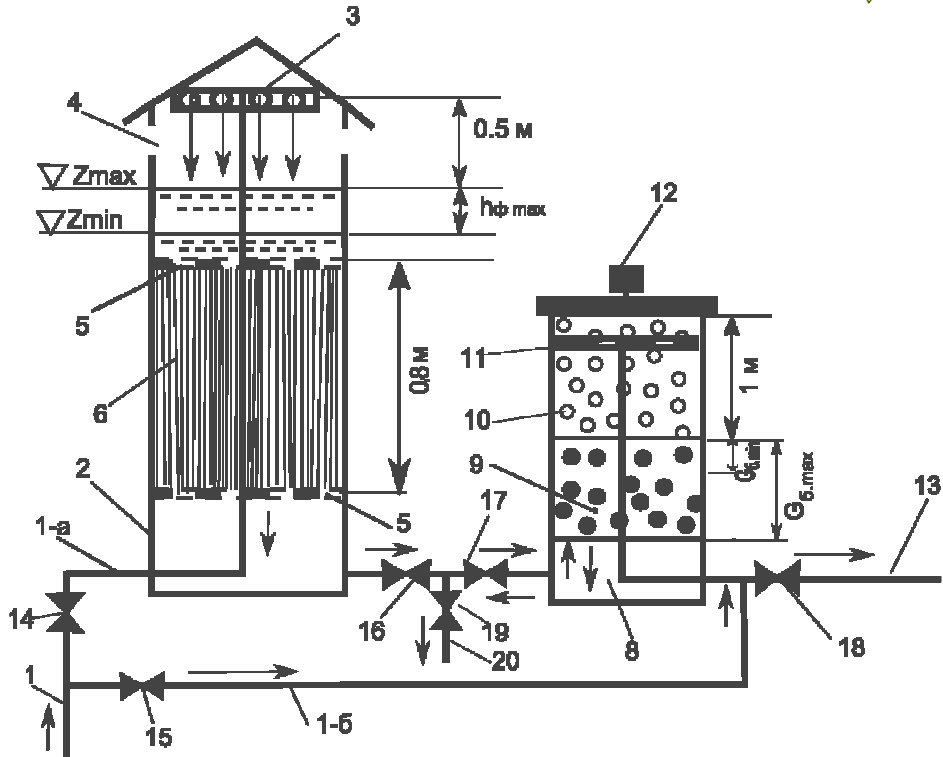


Рис. 1. Технологічна схема лабораторної установки для знезалізнення води біологічним методом:

- 1 – подача вихідної води; 1-а – на очищення; 1-б – на промивку фільтра;  
 2 – біореактор; 3 – аератор; 4 – повітропропускні вікна; 5 – колосникові ре-  
 шітки; 6 – волокнисте завантаження; 7 – контактний прояснювальний  
 фільтр; 8 – підфільтровий простір; 9 – осад з  $Fe(OH)_3$ ; 10 – пінополістирольне  
 плаваюче завантаження; 11 – ковпачковий дренаж; 12 – вантуз; 13 – відве-  
 дення очищеної води; 14-19 – засувки;  
 20 – скидання промивної води

КПФ призначений для прояснення води до нормативних значень (вміст заліза не більше  $0,2 \text{ мг/дм}^3$ ) при висхідному русі води, що забезпечується питомою брудомісткістю фільтра в межах між  $G_{б.min}$  і  $G_{б.max}$ .

Питомою брудомісткістю фільтра називається кількість осаду в підфільтровому просторі КПФ, що припадає на  $1 \text{ м}^2$  поверхні фільтра та визначається 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 молеку-

лярної 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/см<sup>3</sup>;  $T_{\phi,k}$  – тривалість фільтрування води до k-го моменту часу протягом фільтроциклу, год.

При брудомісткості  $G_{б, \min}$  (рис. 1) КПФ забезпечує допустимий вміст заліза у фільтрованій воді, а при  $G_{б, \max}$  – його потрібно виключати на промивку, яка здійснюється шляхом подачі вихідної води по трубопроводу 1-б при закритих засувках 16 і 18 та відкритих засувках 15 і 20. Вода рухається у зворотньому напрямку через пінополістирольне завантаження зверху вниз, вимиває осад з підфільтрового простору і виносить його з промивною водою по трубі 20. Тривалість промивки фільтра  $t_{пр}$  з певною інтенсивністю  $q_{пр}$  повинна забезпечити зменшення питомої брудомісткості КПФ з  $G_{б, \max}$  до  $G_{б, \min}$ .

В задачі лабораторних досліджень входило вивчення основних факторів впливу на ефективність роботи водознезалізнювальної установки при прямоточному русі води через БР і КПФ з відключенням КПФ на промивку після досягнення максимальних втрат напору у завантаженні  $h_{\phi, \max}$ , яким відповідає максимальна питома брудомісткість  $G_{б, \max}$ , отже, і гранично допустимий вміст заліза у фільтрованій воді.

Брудомісткість БР визначалась за формулою

$$G_{б,к} = 0,001 K_n V_{\phi} \frac{\omega_{\phi}}{\omega_{в}} \sum_0^{T_{\phi,к}} (C_{o,i} - C_{\phi,i}) T_{\phi,i}, \text{ кг/м}^2, \quad (5)$$

де  $\omega_{в}$  і  $\omega_{\phi}$  – площа відповідно бокової поверхні всіх ниток волокнистого завантаження і КПФ, м<sup>2</sup>.

Величина  $\omega_{в}$  визначається за формулою

$$\omega_{в} = \pi d_{в} H_{в} N, \quad (6)$$

де  $d_{в}=0,001$  м;  $H_{в}=0,8$  м і  $N=155$  шт – діаметр, висота і кількість ниток волокнистого завантаження. Отже,  $\omega_{в}=3,14 \cdot 0,001 \cdot 0,8 \cdot 155=0,39$  м<sup>2</sup>.

При діаметрі КПФ  $d_{\phi}=0,144$  м, його площа

$$\omega_{\phi} = \frac{\pi d_{\phi}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,144^2}{4} = 0,0162 \text{ м}^2. \quad (7)$$

При  $V_{\phi}=7$  м/год, брудомісткості БР і КПФ визначаються за формулами:

$$G_{б.к} = 0,001 \cdot 1,91 \cdot 7 \frac{0,016}{0,39} \sum_0^{T_{ф.к}} (C_{o.i} - C_{ф.i}) T_{ф.i} = \quad (8)$$

$$= 7,765 \cdot 10^{-5} \sum_0^{T_{ф.к}} (C_{o.i} - C_{ф.i}) T_{ф.i};$$

$$G_{ф.к} = 0,001 \cdot 1,91 \cdot 7 \sum_0^{T_{ф.к}} (C_{o.i} - C_{ф.i}) T_{ф.i} = 0,0134 \sum_0^{T_{ф.к}} (C_{o.i} - C_{ф.i}) T_{ф.i}. \quad (9)$$

Як бачимо з рис. 2, протягом часу  $T_n=47$  год на нитках волокнистого завантаження відбувається накопичення осаду з гідроксиду заліза  $Fe(OH)_3$  (зона I). Після цього часу відривається плівка з цим осадом з волокон БР і вносився в підфільтровий шар КПФ (зона II). При швидкості фільтрування  $V_{ф}=7$  м/год=0,002 м/с цей винос триває  $T_v=92$  години, що збільшує вміст заліза у вихідній воді та зменшує ефективність роботи водознезалізнювальної установки.

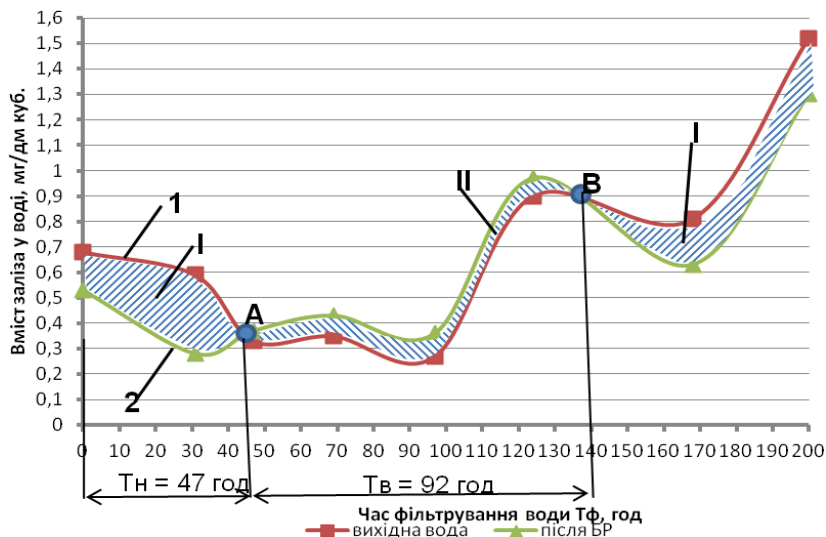


Рис. 2. Показники роботи БР протягом фільтроциклу:  
1 – вміст заліза у вихідній воді, мг/дм<sup>3</sup>; 2 – те саме, у воді після БР, мг/дм<sup>3</sup>;  
I – зона накопичення осаду на волокнах БР;  
II – зона виносу осаду з БР

На рис. 3 показано графіки зміни показників роботи КПФ протягом фільтроциклу.

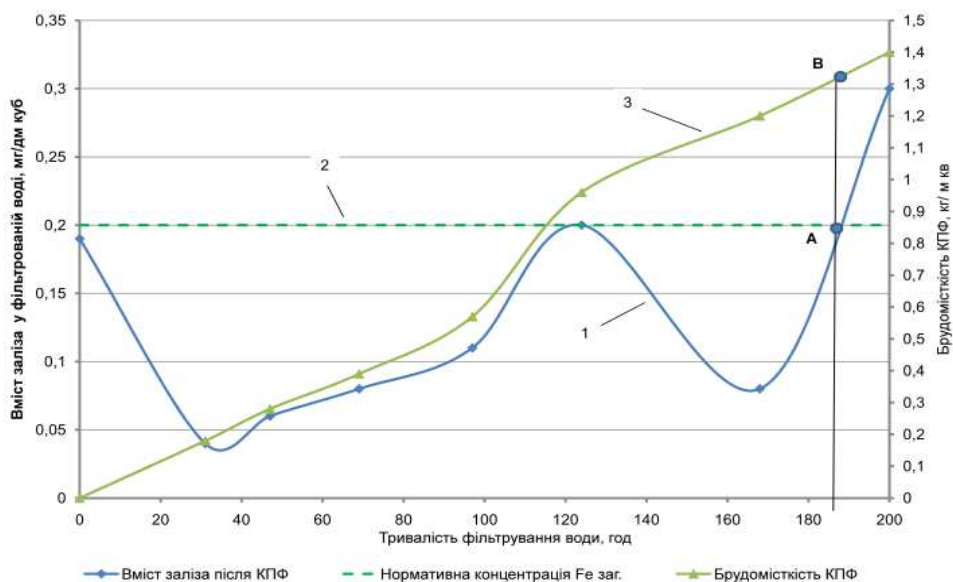


Рис. 3. Показники роботи КПФ протягом фільтроциклу:  
1 – вміст заліза у фільтрованій воді, мг/дм<sup>3</sup>; 2 – нормативний вміст заліза у питній воді ( $C_n=0,2$  мг/дм<sup>3</sup>); величина брудомісткості КПФ, кг/м<sup>2</sup>

Абсциса точки пересікання ліній 1 і 2 визначає максимальну тривалість фільтрування води на даній установці ( $T_{\phi}=185$  год), а ордината точки В для цієї тривалості фільтроциклу визначає максимальну питому брудомісткість КПФ  $G_{б.маx}=1,33$  кг/м<sup>2</sup>, при якій необхідно виключати фільтр на промивку. Кількість осаду з гідроксиду заліза  $Fe(OH)_3$  є одним із основних факторів, що впливають на якість фільтрованої води, отриманої на такій установці з даною швидкістю фільтрування  $V_{\phi}$ .

При проведенні досліджень, контролювалась якість вихідної води, яка надходила на установку з водонапірної башти, а в ній вміст заліза змінювався залежно від часу перебування води.

На рис. 4 показано графіки залежності ефективності очистки води на спорудах від питомої брудомісткості.

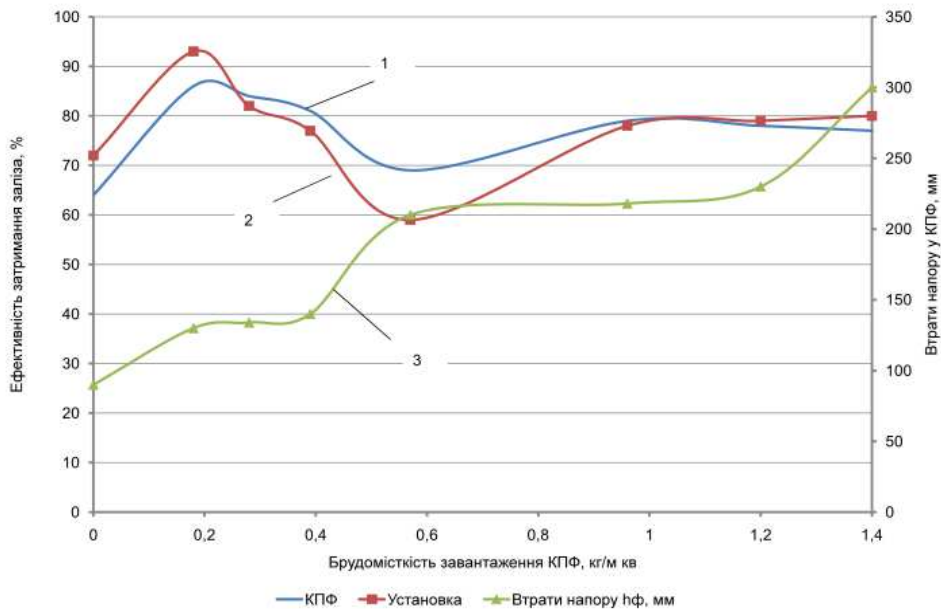


Рис. 4. Залежності ефективності очищення води  $E$  і втрат напору  $h_f$  від питомої брудомісткості фільтрувального завантаження:  
1 –  $E=f(G_\phi)$  на КПФ; 2 –  $E=f(G_\phi)$  на установці; 3 –  $h_f=f(G_\phi)$

Як бачимо з графіків, БР впливає на ефективність роботи як КПФ, так і водознезалізнювальної установки в цілому:

- при виносі осаду в підфільтровий простір КПФ зменшується ефективність його роботи, збільшується величина питомої брудомісткості КПФ, а отже, зменшується тривалість фільтроциклу.

Втрати напору на КПФ при швидкості фільтрування води  $V_\phi=7$  м/год за період фільтроциклу зростають від 90 мм (в чистому завантаженні) до 300 мм. При цих втратах напору, яким відповідає максимальна питома брудомісткість  $G_{\phi,max}=1,33$  кг/м<sup>2</sup>, фільтр необхідно виключати на промивку. За час фільтроциклу  $T_\phi=185$  години

КПФ площею  $\omega_\phi = \frac{\pi d_\phi^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,144^2}{4} = 0,0162$  м<sup>2</sup> мав максимальну

питому брудомісткість  $G_{\phi,max}=1,33$  кг/м<sup>2</sup>, тобто затримав осад з гідроксиду заліза  $Fe(OH)_3$  вагою  $P_{\phi,max}=G_{\phi,max} \cdot \omega_\phi = 1,33 \cdot 0,0162 = 0,0215$  кг.

БР з площею поверхні ниток волокнистого завантаження  $\omega_6 = \pi \cdot d_n \cdot N \cdot l_n = 3,14 \cdot 0,001 \cdot 155 \cdot 0,8 = 0,39$  м<sup>2</sup> при тривалості фільтроциклу (1-й етап)  $T_n=47$  годин та максимальній питомій брудомісткості  $G_{6,max}=0,00072$  кг/м<sup>2</sup> затримав осад з гідроксиду заліза  $Fe(OH)_3$  вагою  $P_{6,max}=G_{6,max} \cdot \omega_6 = 0,00072 \cdot 0,39 = 0,000281$  кг = 0,281 г з утворенням плівки на поверхні волокон масою  $0,281/0,39 = 0,72$  г/м<sup>2</sup> = 7,2 мг/дм<sup>2</sup>.



### **Висновки:**

1. Біологічне знезалізнення підземних вод на установці з БР і КПФ характеризується високою ефективністю очистки води (до 93%) і великою тривалістю фільтроциклу (більше 180 год при  $V_{\phi}=7$  м/год).

2. Під час I етапу роботи БР відбувається біологічне знезалізнення води за допомогою залізобактерій з ефективністю очистки води  $E=80-93\%$  і тривалістю роботи установки  $T_n=47$  год. Під час II етапу роботи БР (винос забруднень в підфільтровий простір КПФ) відбувається знезалізнення води фізико-хімічним методом з ефективністю очистки води  $E=59-78\%$ , що менше ніж при біологічному методі знезалізнення води.

3. Після досягнення максимальної тривалості фільтроциклу на БР ( $T_n=47$  год) його необхідно промити від осаду з  $Fe(OH)_3$  для запобігання його виносу у підфільтровий простір КПФ, щоб збільшити ефективність роботи установки і тривалість фільтроциклу.

4. Основним фактором знезалізнення води на КПФ є кількість осаду з гідроксиду заліза  $Fe(OH)_3$ , що накопичується у його підфільтровому просторі і припадає на  $1 \text{ м}^2$  площі фільтра (питома брудомісткість  $G_{\phi}$ , кг/м<sup>2</sup>). При досягненні максимальної величини  $G_{\phi, \text{max}}$  і відповідних їй максимальних втрат напору  $h_{\phi, \text{max}}$  КПФ необхідно промивати.

1. Николадзе Г. И. Обезжелезивание природных и оборотных вод. М. : Стройиздат, 1978. 1609 с. 2. Хоружий П. Д., Хомуцька Т. П., Хоружий В. П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. К. : Аграрна наука, 2008. 534 с. 3. 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. 4. Орлов В. О., Мартинов С. Ю. Аераційні методи знезалізнення води. *Вода і водоочисні технології*. 2011. № 2(4). С. 42–52. 5. Чернинский С. Н. Руководство по гигиене водоснабжения. М. : Медицина, 1975. 327 с. 6. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. К. : Мінрегіон України, 2013. 172 с. 7. ВБН 46/33-2.5-5-96. Сільськогосподарське водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Норми проектування. К., 1996. 152 с. 8. Grochmann A., Gollasch R., Chumacher G. Biologische enteisenung und entmanganung eines methanhaltigen grundwasser in speyer, GWF, Wasser, Abwasser. 1989. № 9. S. 441–447. 9. Badjo I., Mouches P. Technologies appropriées. L'exemple d'une grande installation de deferrisation biologique au Togo. 38. № 3. P. 197–206. 10. Гвоздяк П. И. Микробиология и биотехнология очистки воды: Quo vadis? *Химия и технология воды*. 1989. № 9. С. 854–858. 11. Патент на корисну модель № 85009. Установка для знезалізнення і зм'якшення води / Стасюк С. Р., Хомуцька Т. П., Хоружий П. Д. Бюл. № 21, 11.11.2013 р.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. Чарний Д. В. (Інститут водних проблем і меліорації)

**Stasiuk S. R.** (Institute of Water Problems and Land Reclamation NAAS, Kyiv)

### **LABORATORY STUDIES OF THE PROCESSES OF IRON REMOVAL FROM GROUNDWATER BY THE BIOLOGICAL METHOD**

The results of laboratory studies are presented for the processes of iron removal from groundwater by the biological method at the installation with bioreactor and contact clarifying filter. The regularities of changes in the content of iron in filtered water during the filtration cycle dependent from multiple factors are established. Recommendations about optimal working regimes of water iron removal installation are developed.

*Keywords:* iron removal, ferrobacterium, bioreactor, filter, oxidation, filtering.

---

**Стасюк С. Р.** (Институт водных проблем и мелиорации НААН, г. Киев)

### **ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД БИОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Приведены результаты лабораторных исследований процессов обезжелезивания подземных вод биологическим методом на установке с биореактором и контактным осветлительным фильтром. Установлены закономерности изменения содержания железа в фильтрованной воде на протяжении фильтроцикла от множества факторов. Разработаны рекомендации оптимальных режимов работы установки обезжелезивания воды.

*Ключевые слова:* обезжелезивание, железобактерии, биореактор, фильтр, окисление, фильтрование.

---