

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-227>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/227>

УДК 628.1

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ТА ПОДАЧІ ПІДЗЕМНИХ ВОД В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ СІЛЬСЬКО-ГОСПОДАРСЬКОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

П.Д. Хоружий<sup>1</sup>, докт. техн. наук, В.Д. Левицька<sup>2</sup>, С.Р. Стасюк<sup>3</sup>, В.В. Нор<sup>4</sup>, Т.П. Хомуцька<sup>5</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-9433-361X>; e-mail: petro1939@bigmir.net;

<sup>2</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-2213-1696>; e-mail: veral@ukr.net;

<sup>3</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0002-7871-6522>; e-mail: sr-stasyuk@ukr.net;

<sup>4</sup> Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0001-7577-8800>; e-mail: rostem29@gmail.com;

<sup>5</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна; <https://orcid.org/0000-0003-0153-4920>; e-mail: itsk@bigmir.net

**Анотація.** Зазначено, що в Україні гостро стоїть проблема постачання питної води належної якості, особливо в сільській місцевості. Основними джерелами водопостачання в локальних сільськогосподарських водопроводах є підземні води. Проте, такі води в Україні часто мають підвищений вміст заліза, що іноді в десятки разів перевищує сучасні нормативні вимоги  $C_n = 0,2 \text{ мг/дм}^3$ . Показано, що для інтенсифікації процесів знезалізнення підземних вод слід застосовувати біологічні методи з розміщенням очисних споруд у корпусі водонапірної бапти (ВБ), що дозволяє значно зменшити капітальні та експлуатаційні витрати. При низхідному русі проаерованої вихідної води через біореактор (БР) відбувається перехід двовалентного заліза у тривалентну форму за допомогою залізобактерій, іммобілізованих на волокнистому завантажженні, а при висхідному русі води через плаваюче пінополістирольне завантаження контактного прояснювального фільтра (КПФ) здійснюється її прояснення від колоїдних частинок із гідроксиду заліза завдяки стисненому їх осіданню в підфільтровому просторі КПФ. Наведено результати лабораторних досліджень зниження рівня заліза в процесі знезалізнення води за певний проміжок часу, запропоновано технологічне вирішення оптимізації конструктивних і технологічних параметрів БР і КПФ при відсутності повторної «зарядки» фільтра. Під час промивки контактено-прояснювального фільтра рекомендовано залишати частину осаду  $G_{\text{min}}$ , який слугуватиме каталізатором для подальшого циклу знезалізнення води. На конкретному прикладі показано, що якість очищеної води залежить від множини конструктивних і технологічних параметрів водознезалізнувальної установки та запропоновано основні принципи її автоматизації для забезпечення оптимальної роботи та методикою розрахунку споруд при мінімізації капітальних і експлуатаційних витрат. Перевагою такої установки є забезпечення високої ефективності знезалізнення води біологічним методом при повній автоматизації процесів фільтрування води та промивки фільтра одночасно зі зменшенням витрат на її будівництво та експлуатацію.

**Ключові слова:** аерація, біореактор, знезалізнення води, залізобактерії, контактено-прояснювальний фільтр.

**Актуальність дослідження.** В Україні проблема постачання питної води належної якості, особливо в сільській місцевості не вирішена. Ситуація з сільським водопостачанням донині залишається однією з найгірших серед країн Європи та СНГ. Лише близько 30% сільських населених пунктів (7664 із 25454) станом на 2018 р. було забезпечено централізованим водопостачанням згідно з [1].

Джерелом водопостачання для локальних сільськогосподарських водопроводів найчастіше є підземні води, оскільки вони краще

захищені від забруднень із поверхні землі [1-6]. Але такі води здебільшого мають підвищений вміст заліза, що в багатьох регіонах України може в десятки разів перевищувати встановлені нормативи для питного водопостачання, і тому виникає необхідність їх знезалізнувати [7, 8].

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Удосконалення технологій очищення та подачі води з метою задоволення водопотреб, зокрема питних, на принципах зниження собі-

вартості водопідготовки та водопостачання є актуальним завданням, яке стоїть перед державою не один десяток років.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нині встановлено [9–22], що найбільш ефективним методом видалення з води розчинних форм заліза є біологічний метод із використанням специфічних залізобактерій, які швидко переводять залізо з двовалентних розчинних його форм  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  у тривалентну форму  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , використовуючи до того ж для своєї життєдіяльності енергію окиснення  $\text{Fe}^{2+}$  у  $\text{Fe}^{3+}$ . Для ефективного біологічного знезалізнення води мають виконуватись такі умови [22]: система має бути прямою; усі гідробіоти (залізобактерії) повинні бути іммобілізованими на нерозчинних у воді насадках; слід створювати максимально можливу концентрацію залізобактерій у всьому об'ємі біореактора.

Така технологія ефективно здійснюється на установках із біореакторами (БР) і контактньо-прояснювальними фільтрами (КПФ). В якості насадок у БР, для іммобілізації на них залізобактерій, найкраще використовувати тонкі волокнисті матеріали – нитки, джгути, насадки типу вії [21, 23], які дуже міцні, стійкі до гідромеханічних навантажень, оскільки виготовляються з полімерних матеріалів, що допускаються Міністерством охорони здоров'я України в схемах питного водопостачання [22], а при роботі створюють доступні для інтенсивного масообміну зони. Для завантаження КПФ доцільно застосовувати спінений полістирол марки А, допущений Міністерством охорони здоров'я України для використання в спорудах питного водопостачання [22, 24].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Запропоновано удосконалення технології комплексного знезалізнення підземних вод із використанням автоматизованих систем регулювання подачею води та промивками контактньо-прояснювального фільтра (КПФ). При висхідному русі води відбувається гідравлічне сортування по крупності гранул пінополістирола, при якому крупні гранули, які легші, піднімаються вгору, а шар із дрібних гранул розташовується внизу, що створює специфічні умови під час прояснення води: забруднення затримуються у підфільтровому просторі КПФ та нижньому його шарі, оскільки верхні його шари виконують роль зворотного фільтра для перешкоджання виносу дрібних фракцій завантаження з корпусу фільтра.

У підфільтровому просторі КПФ відбуваються процеси флокуляції мікропластівців із гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  з укрупненням їх до розмірів, при яких вони випадають в осад під дією сил тяжіння. Цей осад виконує роль каталізатора, що пришвидшує процес переходу двовалентного заліза  $\text{Fe}^{2+}$  у тривалентну форму  $\text{Fe}^{3+}$ .

Корисна робота КПФ триває в межах зміни його питомої брудомісткості  $G$  від  $G_{\min}$  до  $G_{\max}$ . Для створення величини  $G_{\min}$  виконується «зарядка» фільтра, а після досягнення величини  $G_{\max}$  фільтр слід промивати, зменшуючи питому брудомісткість до величини  $G_{\min}$ .

Залежно від вмісту заліза у вихідній воді  $C_v$ , мг/дм<sup>3</sup>, конструктивних параметрів фільтрувального завантаження (діаметрів гранул  $d_g$ , мм, коефіцієнта їх неоднорідності  $K_n$  та товщини засипки  $H_\phi$ ) і швидкості висхідного фільтрування води  $V_\phi$ , м/год., питома кількість осаду з гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  у підфільтровому просторі КПФ (питома брудомісткість фільтра  $G$ , кг/м<sup>2</sup>) для забезпечення нормативних показників вмісту заліза у фільтрованій воді для питних потреб  $C_n = 0,2$  мг/дм<sup>3</sup> повинна бути в межах:

$$G_{\min} \leq G \leq G_{\max}, \text{ кг/м}^2, \quad (1)$$

Контроль за цим показником здійснюється шляхом вимірювання втрат напору на КПФ за допомогою дифманометра.

Для цього промивку фільтра при певній інтенсивності промивки  $q_{\text{пр}}$ , дм<sup>3</sup>/см<sup>2</sup> необхідно виконувати протягом певного часу  $t_{\text{пр}}$ , хв. Ці величини визначаються для конкретних умов під час пусконаладжувальних робіт установки знезалізнення води, яку доцільно споруджувати в корпусі водонапірної башти [22, 25].

Дослідження роботи водознезалізнювальної установки та визначення її раціональних параметрів при фільтруванні води і промивці фільтра дасть змогу удосконалити відомі технології знезалізнення підземних вод в автоматизованих системах сільгосподопостачання [25].

**Мета та методика досліджень.** Метою роботи є удосконалення технологій знезалізнення та подачі підземних вод в автоматизованих системах сільськогосподарського водопостачання. Для досягнення мети обов'язковим є вирішення таких задач:

– встановити залежності змін втрат напору на КПФ при висхідному фільтруванні води з різними швидкостями, в межах яких при певних конструктивних параметрах фільтра і якості вихідної води забезпечується нормативний вміст заліза у фільтрованій воді;

– визначити величини тривалості промивки КПФ з певною інтенсивністю для зменшення питомої брудомісткості фільтра з  $G_{\max}$  до  $G_{\min}$ , отримані при фільтруванні води з різними швидкостями;

– удосконалити технологічну схему баштової водознезалізнювальної установки при повній автоматизації процесів фільтрування води і промивки фільтра.

При виконанні цих завдань були використані лабораторні дослідження процесів біологічного знезалізнення підземних вод на установці з БР і КПФ. [26], проведена обробка отриманих результатів та встановлено певні закономірності.

**Аналіз отриманих результатів та їх обговорення.** При відомих значеннях якості вихідної води  $C_{\text{в}}$  та вибраних конструктивних параметрах прояснювального фільтра ( $H_{\text{ф}}$ ,  $d_{\text{с}}$ ,  $K_{\text{н}}$ ) вміст заліза у фільтрованій воді  $C_{\text{ф}}$  і втрати напору на фільтрі  $h_{\text{ф}}$  при висхідному фільтруванні залежать тільки від швидкості фільтрування води  $V_{\text{ф}}$  та питомої брудомісткості фільтра в даний момент фільтроциклу  $G$  (рис. 1).

Лабораторні дослідження були виконані при таких конструктивних параметрах пінополістирольного фільтра: еквівалентний діаметр гранул завантаження  $d_{\text{с}} = 1,09$  мм, коефіцієнти їх неоднорідності  $K_{\text{н}} = 1,47$ ; товщина засипки  $H_{\text{ф}} = 1,0$  м. Питома брудомісткість фільтра, що характеризує кількість осаду з гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , затрима-

ного у фільтрі, що припадає на  $1\text{ м}^2$  площі фільтра у конкретний момент часу визначається за формулою:

$$G_{\text{к}} = 0,001 K_{\text{н}} V_{\text{ф}} \sum_n^{T_{\text{ф.к}}} (C_{\text{в.ср.і}} - C_{\text{ф.ср.і}}) T_{\text{ф.і}}, \text{ кг/м}^2, \quad (2)$$

де  $K_{\text{н}}$  – перевідний коефіцієнт, що враховує співвідношення молекулярної маси гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  до атомної маси двовалентного заліза:

$$K_{\text{н}} = \frac{M[\text{Fe}(\text{OH})_3]}{A\text{Fe}^{2+}} = \frac{107}{56} = 1,91, \quad (3)$$

де  $C_{\text{в.ср.і}}$  і  $C_{\text{ф.ср.і}}$  – середній вміст заліза відповідно у вихідній і фільтрованій воді за інтервал часу між сусідніми вимірюваннями  $T_{\text{ф.і}}$ ,  $\text{ мг/дм}^3$ ;

$T_{\text{ф.к}}$  – тривалість фільтрування води від початку фільтроциклу і до даного (к-го) моменту часу, год.;

$V_{\text{ф}}$  – швидкість фільтрування води.

На рис. 1 наведено такі дані при середньому рівні заліза у вихідній воді  $C_{\text{в.ср}} = 1,1$   $\text{ мг/дм}^3$  і швидкості висхідного фільтрування води  $V_{\text{ф}} = 7$   $\text{ м/год}$ . Точки А і В, утворені при перетині ліній 1 і 4, характеризують основні показники роботи фільтра. Абсциса точки А визначає тривалість «зарядки» фільтра  $T_{\text{зар}}$  протягом якої при даній швидкості  $V_{\text{ф}} = 7$   $\text{ м/год}$ . і середньому вмісті заліза у вихідній воді  $C_{\text{в}} = 1,1$   $\text{ мг/дм}^3$ . Ця вимога виконується протягом корисної роботи фільтра

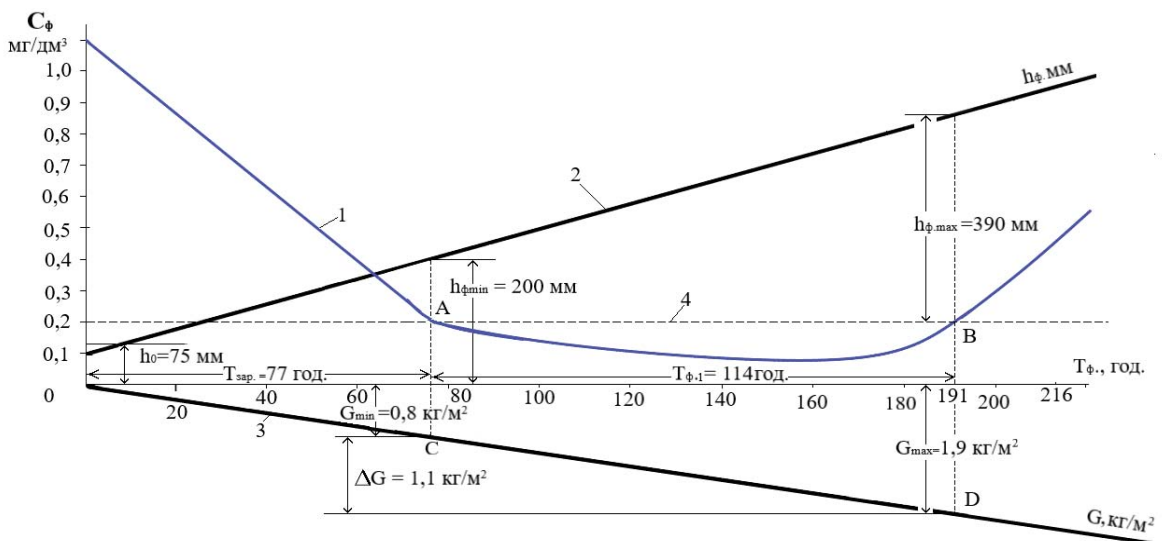


Рис. 1. Графіки зміни показників процесу знезалізнення води на пінополістирольному фільтрі протягом фільтроциклу при  $C_{\text{в}} = 1,1$   $\text{ мг/дм}^3$  і  $V_{\text{ф}} = 7$   $\text{ м/год}$ .: 1 – вміст заліза у фільтрованій воді  $C_{\text{ф}} = f(T_{\text{ф}})$ ; 2 – втрати напору на фільтрі  $h_{\text{ф}} = f(T_{\text{ф}})$ ; 3 – питома брудомісткість фільтра  $G = f(T_{\text{ф}})$ ; 4 – нормативний вміст заліза у питній воді  $C_{\text{н}} = 0,2$   $\text{ мг/дм}^3$ ; А і В – характерні точки на графіку 1; С і D – характерні точки на графіку 3

тривалістю  $T_{\phi,1}$ , під час якої питома брудомісткість фільтра змінюється від  $G_{\min}$  до  $G_{\max}$ , а втрати напору змінюються від  $h_{\phi,\min}$  до  $h_{\phi,\max}$ .

Як бачимо з рис. 1, при вибраних конструктивних параметрах фільтра та існуючій якості вихідної води, тривалість першої зарядки фільтра дорівнює  $T_{\text{зар.}} = 77$  год., тривалість корисної роботи фільтра становить  $T_{\phi,1} = 114$  год., у межах якої питома брудомісткість фільтра змінюється від  $G_{\min} = 0,8$  кг/м<sup>2</sup>, до  $G_{\max} = 1,9$  кг/м<sup>2</sup> на величину  $\Delta G = G_{\max} - G_{\min} = 1,1$  кг/м<sup>2</sup>, а відповідні їм втрати напору на фільтрі зростають від  $h_{\phi,\min} = 200$  мм до  $h_{\phi,\max} = 390$  мм на  $\Delta h_{\phi} = 190$  мм.

Щоб не робити щоразу для нового фільтроциклу «зарядку» фільтра, необхідно під час його промивки видаляти тільки залишки гідроксиду заліза величиною  $\Delta G$ , кг/м<sup>2</sup>, залишаючи в кінці промивки його мінімальну величину  $G_{\min} = 0,8$  кг/м<sup>2</sup>. Це досягається при дотриманні розрахункової тривалості промивки фільтра  $t_{\text{пр.}}$  із вибраною інтенсивністю промивки  $q_{\text{пр.}}$ , дм<sup>3</sup>/с\*м<sup>2</sup> (рис. 2). Промивку фільтра здійснювали з інтенсивністю  $q_{\text{пр.1}} = 12,3$  дм<sup>3</sup>/с\*м<sup>2</sup> і  $q_{\text{пр.2}} = 18,7$  дм<sup>3</sup>/с\*м<sup>2</sup>.

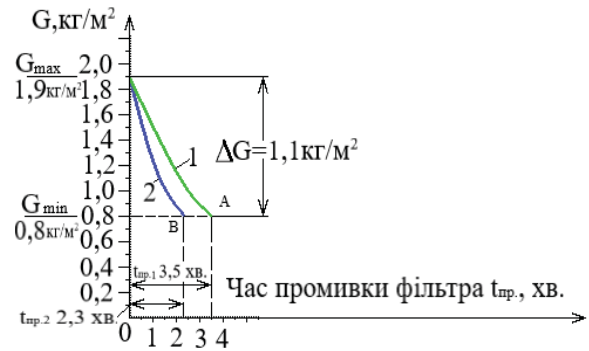


Рис. 2. Графіки виносу з пінополістирольного фільтра надлишкового осаду  $\Delta G = 1,1$  кг/м<sup>2</sup> при інтенсивності промивки фільтра: 1 –  $q_{\text{пр.1}} = 12,3$  дм<sup>3</sup>/с\*м<sup>2</sup>; 2 –  $q_{\text{пр.1}} = 18,7$  дм<sup>3</sup>/с\*м<sup>2</sup>; А і В – характерні точки на графіках з ординатами  $G_{\min} = 0,8$  кг/м<sup>2</sup>

Абсциси точок А і В на графіках 1 і 2 рис. 2 при ординаті  $G_{\min} = 0,8$  кг/м<sup>2</sup> визначають при інтенсивностях промивки відповідно  $q_{\text{пр.1}} = 12,3$  дм<sup>3</sup>/с\*м<sup>2</sup> і  $q_{\text{пр.2}} = 18,7$  дм<sup>3</sup>/с\*м<sup>2</sup>, які дорівнюють  $t_{\text{пр.1}} = 3,5$  хвилини і  $t_{\text{пр.2}} = 2,3$  хвилини.

При інших показниках якості вихідної води  $C_{\text{в.}}$ , конструктивних параметрах фільтра ( $d_{\text{с}}$ ,  $K_{\text{н}}$ ,  $H_{\phi}$ ) та швидкості висхідного фільтрування

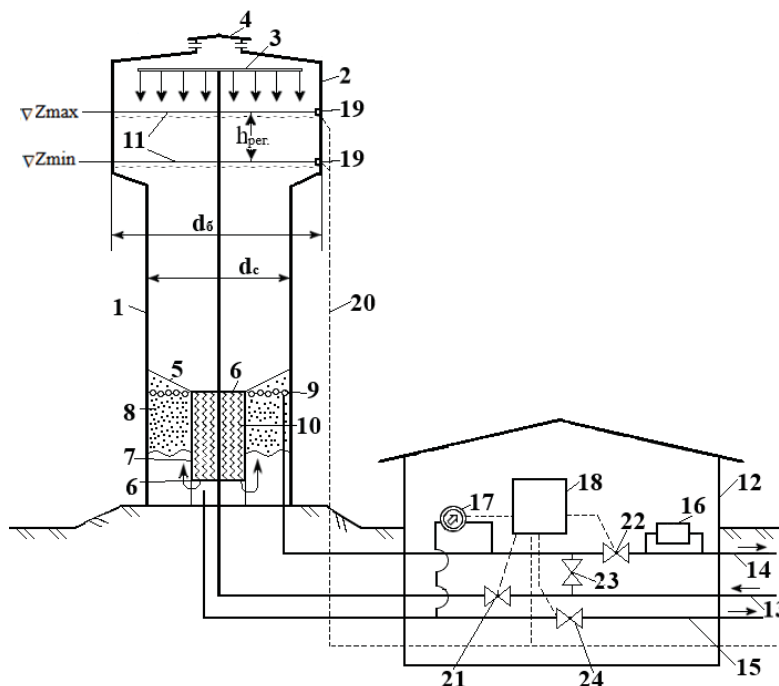


Рис. 3. Баштова автоматизована водознезалізнювальна установка:

- 1 – стовбур башти; 2 – бак башти; 3 – аератор; 4 – люк; 5 – контактний-прояснювальний фільтр;
- 6 – колосникова решітка; 7 – біореактор; 8 – плаваюче фільтрувальне завантаження;
- 9 – ковпачковий дренаж; 10 – волокнисте завантаження; 11 – рівні води мінімальний і максимальний;
- 12 – службове приміщення; 13 – подача вихідної води; 14 – подача води споживачам;
- 15 – промивний трубопровід; 16 – бактерицидна установка; 17 – дифманометр;
- 18 – шафа управління; 19 – реле рівнів; 20 – передача інформації; 21–24 – засувки

води  $V_{\phi}$  наведені розрахункові параметри КПФ будуть іншими, а тому для конкретних умов при пусконаладжувальних операціях водознезалізнювальної установки необхідно їх визначати для забезпечення ефективної роботи останньої та мінімізації собівартості очищеної води.

**Викладення основного матеріалу.** Щодо вдосконалення роботи баштової автоматизованої водознезалізнювальної установки, для повної автоматизації процесів знезалізнення води на баштовій водознезалізнювальній установці [22, 25] запропонована технологічна схема автоматизації подачі води на установку і промивка фільтра шляхом встановлення в службовому приміщенні шафи управління, з якої передаються електричні сигнали на управління засувками залежно від рівнів води в баку башти та інформації від дифманометра та реле часу (рис. 3).

Перевагою створення установки є зменшення її будівельної вартості при забезпеченні повної автоматизації роботи.

Поставлене завдання вирішено тим, що в баштовій водознезалізнювальній установці з метою зменшення об'єму водонапірного бака встановлено реле рівнів, які управляють роботою відцентрового насоса, що подає воду в бак для її знезалізнення, а для управління процесами промивки освітлювального фільтра у службовому приміщенні встановлено шафу з реле часу для автоматизації управління засувками з електроприводом залежно від втрати напору у освітлювальному фільтрі (дифманометр) і часу його промивки (реле часу).

Принцип дії установки такий: при подачі вихідної води по трубопроводу 13 через аератор 3 та розбризкуванні на дрібні крапельки та падіння з висоти не менше 0,5 м над максимальним рівнем води у баку  $Z_{\max}$  вихідна вода інтенсивно насичується киснем повітря, що приймає участь у її знезалізненні за допомогою залізобактерій, прикріплених у волокнистому завантаженні 10, волокна якого натягнуті між колосниковими решітками 6.

Після біореактора 7 вода рухається знизу догори через плаваюче фільтрувальне завантаження 8, в якому здійснюється контактна коагуляція мікропластівців гідроксиду заліза, що випадають в осад під дією сил тяжіння, а освітлена вода збирається ковпачковим дренажем 9 і відводиться по трубопроводу 14 споживачам і знезаражується бактерицидною установкою 16. Контактний дифманометр 17 вимірює різницю тисків у підфільтровому просторі КПФ і в трубопроводі 14

та при досягненні максимального значення надходить сигнал у шафу управління для проведення промивки фільтра, під час якої з допомогою електроприводів закриваються засувки 21 і 22 та відкриваються засувки 23 і 24. Промивка фільтра із заданою інтенсивністю триває певний час, який контролюється реле часу. По його закінченню закриваються послідовно засувки 23 і 24 та відкриваються засувки 21 і 22 і фільтроцикл повторюється.

За допомогою реле рівнів 19 автоматично вмикається (при рівні  $Z_{\min}$ ) і вимикається (при рівні  $Z_{\max}$ ) відцентровий насос, що подає вихідну воду у водонапірний бак, що зменшує об'єм бака, а отже і вартість установки.

При розрахунках такої установки визначають основні розміри її елементів: відмітка найнижчого рівня води у баку водонапірної башти  $Z_{\min}$  визначається з вимог забезпечення величини необхідного вільного напору  $H_{\text{віль.}}$  у диктуючій точці водопровідної мережі:

$$Z_{\min.} = Z_{\text{д.т.}} + H_{\text{віль.}} + \Sigma h, \text{ м}, \quad (4)$$

де  $Z_{\text{д.т.}}$  – відмітка поверхні землі в диктуючій точці, м;  $H_{\text{віль.}}$  – величина потрібного вільного напору в цій точці, м;  $\Sigma h$  – сума втрат напору, на шляху руху води від водонапірної башти до цієї точки у період найбільшого водоспоживання в мережі, м.

Відмітка найвищого рівня води у баку башти  $Z_{\max}$  визначаються за формулою:

$$Z_{\max.} = Z_{\min.} + h_{\text{рег.}}, \text{ м}, \quad (5)$$

де  $h_{\text{рег.}}$  – глибина регулюючого об'єму води у баку, що визначається за формулою:

$$h_{\text{рег.}} = \frac{Q_{\text{н.ср.}}}{\pi d_{\phi}^2 n_{\text{рег.}}}, \text{ м}, \quad (6)$$

де  $Q_{\text{н.ср.}}$  – середня подача води від свердловинного насоса між включенням його в роботу і відключенням;

$$Q_{\text{н.ср.}} = Q_{\text{макс. в.м.}}, \text{ м}^3/\text{год.}, \quad (7)$$

де  $Q_{\text{макс. в.м.}}$  – витрата води в годину найбільшого водоспоживання  $\text{м}^3/\text{год.}$ ;

$n_{\text{рег.}}$  – максимальна кількість включень насоса за годину ( $n_{\text{рег.}} = 6-8$ );

$d_{\phi}$  – діаметр баку башти, що дорівнює:

$$d_{\phi} = d_c + 2 \text{ м}, \quad (8)$$

де  $d_c$  – діаметр стовбура башти, в якому розміщується водознезалізнювальна установка, визначається за формулою:

$$d_c = \sqrt{1,27 Q_{\text{н.ср.}} \frac{V_{\phi.} + V_{\phi.p.}}{V_{\phi.} * V_{\phi.p.}}}, \text{ м}, \quad (9)$$

де  $V_{\phi}$  і  $V_{б.р.}$  – швидкість руху води, прийнято відповідно у КПФ та БР м/год.

**Висновки.** Оскільки в підземних водах України, що найчастіше використовуються як джерело водопостачання в локальних сільськогосподарських водопроводах, знаходиться підвищений вміст заліза, то найбільш ефективним методом його видалення є біологічний метод з розміщенням БР і КПФ у стовбурі водонапірної башти, що дає можливість створювати необхідні регулюючі об'єми води та забезпечувати подачу розрахункових витрат очищеної води під необхідним напором.

Для удосконалення технології знезалізнення підземних вод запропоновано автоматизовані водознезалізнювальні установки, управління роботою яких ведеться залежно від втрат напору на фільтрі (при фільтруванні води) та часу промивки фільтра з певною інтенсивністю.

Нормативний вміст заліза у фільтрованій воді забезпечується в межах питомої брудомісткості фільтра від  $G_{\min}$  до  $G_{\max}$ , величини яких залежать від показників якості вихідної

води  $C_{в}$ , конструктивних параметрів фільтра ( $d_{с}$ ,  $K_{п}$ , і  $H_{\phi}$ ) та швидкості висхідного фільтрування  $V_{\phi}$ .

Щоб не «заряджати» фільтр під час наступного фільтроциклу його промивку необхідно виконувати з вибраною інтенсивністю  $q_{пр}$ , тільки протягом розрахункового часу  $t_{пр}$ , зменшуючи питому брудомісткість фільтру від  $G_{\max}$  до  $G_{\min}$ , на величину  $\Delta G$ . Розрахункові параметри КПФ і мінімальний  $h_{\phi, \min}$  та максимальний  $h_{\phi, \max}$  втрати напору на фільтрі, що контролюються дифманометром, та час промивки фільтра  $t_{пр}$  з вибраною інтенсивністю  $q_{пр}$ , необхідно визначати для конкретних умов при пусконаладжувальних операціях побудованої водознезалізнювальної станції.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Застосування біологічних методів очистки підземних вод у баштових автоматизованих водознезалізнювальних установках дасть можливість надійно забезпечувати сільських споживачів якісною питною водою в локальних водопроводах при мінімальних капітальних та експлуатаційних витратах.

### Бібліографія

1. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2018 р. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2019. 351 с. URL: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2019/11/Proekt-Nats.-dop.-za-2018.pdf>
2. Водний кодекс України за станом на 21 лютого 2020 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80>
3. Про Загальнодержавну цільову програму: Питна вода України на 2011-2020 роки. Закон України №3933-VI від 20.10.2011. ВВР, 2012, № 24, ст. 247. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2455-15>
4. ДБН В.2.5-74:2013 Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіон 2013. 301 с. URL: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/12/101.1.-DBN-V.2.5-742013.-Vodopostachannya.-Zovnishni-merezhi.pdf>
5. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2017 р. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2018. 407 с. URL: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/12/Proekt-Nats.-dop.-za-2016-rik.pdf>
6. Стан підземних вод України. Щорічник. Київ: Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України». 2018. 121 с. URL: [http://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2019/07/schorichnyk\\_stan\\_pv\\_2018\\_1.pdf](http://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2019/07/schorichnyk_stan_pv_2018_1.pdf)
7. ДСТУ 7525:2014. Вода питна. Вимоги та методи контролю якості. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014 25 с.
8. Державні санітарні норми та правила Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною (ДСанПіН 2.2.4-171-10). Затверджені наказом МОЗ України від 12.05.2010 р № 400 зі змінами. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10>
9. Ankrah D.A., Sogaard E.G. A review of biological iron removal. Thirteenth International Water Technology Conference, Elurghada, Egypt, 2009. – P. 999–1005.
10. Badjo I., Moucher P. Technologies appropriées. L'exemple d'une grande installation de deferrisation biologique au togo. 38, № 3. P 197–206
11. Benz M., Brune A, Schink B. Anaerobic and aerobic oxidation of ferrous iron at neutral pH by chemoheterotrophic nitrate-reducing bacteria. Arch. Microbiol V. – 1998. – 169 (2). – P. 159–165.

12. Dzombak D.A. Surface complexation modeling – Hydrous ferric oxide. F. M. M. Morel. – New York : John Wiley, 1990. – 393 p.
13. Grochmann A., Gollasch R., Chumacher G. Biologische enteisenung und entmanganung eines methanhaltigen grundwasser in Speyir. GWF, Wasser, Abwasser. 1989, 9. S. 441–447.
14. Hofmann Dr J., Hantzschel Dr. L. Abbau von organischen schadstoffen in grundwassern durch katalytische oxidation. Chem.-Ing.-Techn, 2002. – № 2. – P. 3–5
1. Kappler A., Straub K. L. Geomicrobiological cycling of iron. Rev. Mineral. Geochem, 2005. V. 59. P. 85–108.
15. Lavanya R.S., Ulavi S., Lokesh K.S., Water softening and de-ironing of ground water using sulfonated polystyrene beads. M. Tech Scholar. International journal of engineering research & technology. 2014. V 3. P. 2124–2127.
16. Martin S.T. Precipitation and Dissolution of Iron and Manganese Oxides. Chapter 4 of Environmental Catalysis / Editor Vicki H. Grassian., September 2003
17. Mikhnevich E.I., Propolsky D.E. Methods of deironing of water, analysis and condition of their use. Melioration. – 2017. – № 2(80). – P. 59–65.
18. Ocinski D., Jacukowicz-Sobala I., Mazur P., Raczky J., Kociolek-Balawejder E. Water treatment residuals containing iron and manganese oxides for arsenic removal from water. Characterization of physicochemical properties and adsorption studies. Chemical Engineering Journal 294. 2016. P. 210–221.
19. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 19th edition, American Public Health Association. American Water Works Association. Water Environment Federation, Washington DC, 1995.
20. Гвоздяк П.И. Микробиология и биотехнология очистки воды: Quo vadit? // Химия и технология воды. 1989. № 9. С. 854–858.
21. Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. Київ: Аграрна наука, 2008. 534 с.
22. Гвоздяк П.И. Біохімія води. Біотехнологія води (автомонографія). Київ: Видавничий дім «Києво-Могилянська академія». 2019. 228 с.
23. Орлов В.О., Мартинов С.Ю. Аераційні методи знезалізнення води. Вода і водоочисні технології. 2011, № 2. С.42–52.
24. Нор В.В., Хомуцька Т.П. Забезпечення економічної та надійної роботи систем сільськогосподарського водопостачання (на прикладі системи водопостачання села Тарасівка Київської області) // Меліорація і водне господарство. 2019. № 2. С. 175–185.
25. Стасюк С.Р. Лабораторні дослідження процесів знезалізнення підземних вод біологічним методом // Вісник НУВГП «Технічні науки» м. Рівне, № 4 (80), 2017. С. 42–51

### References

1. Natsionalna dopovid pro yakist pytnoyi vody ta stan pytnoho vodopostachannya v Ukraini u 2018 r. [National Drinking Water Quality Report and Potable Water Supply Status in Ukraine in 2018]. (2018). Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. Retrieved from: <http://www.minregion.gov.ua/wpcontent/uploads/2017/12/Proekt-Nats.-dop.-za-2016-rik.pdf>. [In Ukrainian].
2. Vodnyy kodex Ukrainy (zi zminamy) [Water Code of Ukraine. (with changes)]. (n.d.). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80> [In Ukrainian].
3. Zakon Ukrainy “Pro Zahalnodержavnu tsilovu programmu Pytna voda Ukrainy na 2011–2020 roky” [Law of Ukraine. National Target Program: Drinking Water of Ukraine for 2011–2020.]: pryiniaty 20 oct. 2011 roku №3933-VI. (2011, October 20). Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy. Kyiv: Parlam. vyd-vo. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2455-15> [In Ukrainian].
4. Vodopostachannya. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennya proektuvannya [Text engl]. (2013). DBN V.2.5-74:2013. State building codes. Kyiv: Minrehion. Retrieved from: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2017/12/101.1.-DBN-V.2.5-742013.-Vodopostachannya.-Zovnishni-merezhi.pdf>. [In Ukrainian].
5. Natsionalna dopovid pro yakist pytnoyi vody ta stan pytnoho vodopostachannya v Ukraini u 2017 r. [National report on drinking water quality and drinking water supply in Ukraine in 2017]. (2017). Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. Retrieved from: <http://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2019/11/Proekt-Nats.-dop.-za-2018.pdf>. [In Ukrainian].

6. Stan pidzemnykh vod Ukrayiny. Shchorichnyk [Groundwater status of Ukraine. Yearbook.]. (2018). Kyiv: State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, State Scientific and Production Enterprise "State Information Geological Fund of Ukraine". Retrieved from: [http://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2019/07/schorichnyk\\_stan\\_pv\\_2018\\_1.pdf](http://geoinf.kiev.ua/wp/wp-content/uploads/2019/07/schorichnyk_stan_pv_2018_1.pdf). [In Ukrainian].
7. Voda pytna. Vymohy ta metody kontrolyu yakosti [Drinking water. Quality control requirements and methods]. (2014). DSTU 7525:2014. Natsionalnyi standart Ukrainy. Kyiv: Minekonomrozvytku Ukrayiny. [In Ukrainian].
8. Hihiyenichni vymohy do vody pytnoyi, pryznachenoï dlya spozhyvannya lyudynoyu [Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption]. (2010). DSanPiN 2.2.4-171-10. Derzhavni sanitarni normy ta pravyla. Kyiv: Ministry of Health of Ukraine. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10>. [In Ukrainian].
9. Ankrah, D.A., & Sogaard, E.G. (2009). A review of biological iron removal. Thirteenth International Water Technology Conference, Elurghada, Egyp, 999–1005.
10. Badjo, I., & Moucher, P. L'exemple d'une grande installation de deferrisation biologique au togo. Technologies appropriées, 38, 3, 197–206.
11. Benz, M., Brune, A., & Schink, B. (1998). Anaerobic and aerobic oxidation of ferrous iron at neutral pH by chemoheterotrophic nitrate-reducing bacteria. Arch. Microbiol., V. 169 (2), 159–165.
12. Dzombak, D. A. (1990). Surface complexation modeling Hydrous ferric oxide. New York: John Wiley.
13. Grochmann, A., Gollasch, R., & Chumacher, G. (1989). Biologische enteisenung und entmanganung eines methanhaltigen grundwasser in Speyer. GWF, Wasser, Abwasser., 9, 441–447.
14. Hofmann, Dr J., & Hantzschel, Dr. L. (2002). Abbau von organischen schadstoffen in grundwassern durch katalytische oxidation. Chem.-Ing.-Techn, 2, 3–5.
15. Kappler, A., & Straub, K. L. (2005). Geomicrobiological cycling of iron. Rev. Mineral. Geochem, V. 59, 85–108.
16. Lavanya, R. S., Ulavi, S., & Lokesh, K. S. (2014). Water softening and de-ironing of ground water using sulfonated polystyrene beads. International journal of engineering research & technology, V 3, 2124–2127.
17. Martin, S.T. (2003). Precipitation and Dissolution of Iron and Manganese Oxides. Environmental Catalysis, Chapter 4. (Ed.). Vicki H. Grassian.
18. Mikhnevich, E.I., & Propolsky, D.E. (2017). Methods of deironing of water, analysis and condition of their use. Melioration, 2(80), 59–65.
19. Ocinski, D., Jacukowicz-Sobala, I., Mazur, P., Raczky, J., & Kocielek-Balawejder, E. (2016). Water treatment residuals containing iron and manganese oxides for arsenic removal from water. Characterization of physicochemical properties and adsorption studies. Chemical Engineering Journal 294, 210–221.
20. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1995). 19th edition, American Public Health Association. American Water Works Association. Water Environment Federation, Washington DC.
21. Gvozdyak, P.I. (1989). Mikrobiologiya i biotekhnologiya ochistki vody: Quo vadit? [Microbiology and biotechnology of water purification: Quo vadit? ]. Khimiya i tekhnologiya vody, 9, 854–858. [In Russian].
22. Khoruzhyy, P.D., Khomutetska, T.P., & Khoruzhyy V.P. (2008). Resursozberihayuchi tekhnolohiyi vodopostachannya [Resource-saving technologies of water supply]. Kyiv: Agrarian Science. [In Ukrainian].
23. Hvozdyak, P.I. (2019). Biokhimiya vody. Biotekhnolohiya vody. [Water biochemistry. Water biotechnology.]. Kyiv: Vydavnychyy dim Kyyevo-Mohylyanska akademiya. [In Ukrainian].
24. Orlov, V.O., & Martynov, S.Yu. (2011). Aeratsiyni metody znezalznennya vody. [Aeration Methods for Water De-Ironing]. Voda i vodoochysni tekhnolohiyi, 2, 42–52. [In Ukrainian].
25. Nor, V.V., & Khomutetska, T.P. (2019). Zabezpechennya ekonomichnoyi ta nadiynoyi roboty system silskohospodarskoho vodopostachannya (na prykladi systemy vodopostachannya sela Tarasivka Kyyivskoyi oblasti). [Provision of economical and reliable operation of agricultural water supply systems (for example, the water supply system of Tarasivka village, Kyiv region)]. Melioratsiya i vodne hospodarstvo, 2, 175–185. [In Ukrainian].
26. Stasyuk, S.R. (2017). Laboratorni doslidzhennya protsesiv znezalznennya pidzemnykh vod biolohichnym metodom [Laboratory studies of the processes of groundwater ironation by biological method]. Visnyk NUVHP Tekhnichni nauky, 4(80), 42–51. [In Ukrainian].



П.Д. Хоружий, В.Д. Левицкая, С.Р. Стасюк,  
В.В. Нор, Т.П. Хомуцкая

**Совершенствование технологий обезжелезивания и подачи подземных вод  
в автоматизированных системах сельскохозяйственного водоснабжения**

**Аннотация.** Отмечено, что в Украине остро стоит проблема снабжения питьевой водой надлежащего качества, особенно в сельской местности. Основными источниками водоснабжения в локальных сельскохозяйственных водопроводах являются подземные воды. Однако, такие воды в Украине часто имеют повышенное содержание железа, иногда в десятки раз превышающие современные нормативные требования  $C_n = 0,2 \text{ мг/дм}^3$ . Показано, что для интенсификации процессов обезжелезивания подземных вод следует применять биологические методы с размещением очистных сооружений в корпусе водонапорной башни (ВБ), что позволяет значительно уменьшить капитальные и эксплуатационные расходы. При нисходящем движении аэрированной исходной воды через биореактор (БР) происходит переход двухвалентного железа в трехвалентную форму с помощью железобактерий, иммобилизованных на волокнистой загрузке, а при восходящем движении воды через плавающую пенополистирольную загрузку контактного осветлительного фильтра (КОФ) осуществляется ее прояснение от коллоидных частиц гидроксида железа благодаря сжатоному их оседанию в подфильтровом пространстве КПФ. Приведены результаты лабораторных исследований снижения уровня железа в процессе обезжелезивания воды за определенный промежуток времени, предложено технологическое решение оптимизации конструктивных и технологических параметров БР и КОФ при отсутствии повторной «зарядки» биофильтра путем уменьшения времени его промывки. Во время промывки контактно-осветлительного фильтра рекомендуется оставлять часть осадка  $G_{min}$ , который будет служить катализатором во время следующего цикла обезжелезивания воды. На конкретном примере показано, что качество очищенной воды зависит от множества конструктивных и технологических параметров установки обезжелезивания воды и предложены основные принципы ее автоматизации для обеспечения оптимальной работы и методика расчета сооружений при минимизации капитальных и эксплуатационных затрат. Преимуществом такой установки является обеспечение высокой эффективности обезжелезивания воды биологическим методом при полной автоматизации процессов фильтрации воды и промывки фильтра одновременно с уменьшением затрат на ее строительство и эксплуатацию.

**Ключевые слова:** аэрация, биореактор, обезжелезивание воды, железобактерия, контактно-осветлительный фильтр.

P.D. Khoruzhyi, V.D. Levytska, S.R. Stasyuk,  
V.V. Nor, T.P. Khomutetska

**Improving the technology of deferrization and ground water supply  
in the automated agricultural water supply systems**

**Abstract.** Ukraine has an urgent problem of supplying adequate quality drinking water, especially in rural areas. Only 30% Ukrainian rural areas are equipped with water supply systems. The main sources of water supply in local agricultural water pipelines are groundwater. However, in Ukraine groundwater is often characterized with a rather high iron content, which is sometimes ten times higher than the current regulatory requirements  $C_n = 0.2 \text{ mg / dm}^3$ . It is shown that to intensify the processes of groundwater deferrization, biological methods should be used with the placement of treatment facilities in the body of the water tower (WT), which can significantly reduce capital and operating costs. When the downward movement of aerated source groundwater through the bioreactor (BR) a transition of divalent iron into a ferric iron form occurs with the help of iron bacteria, immobilized on fibrous media, and when the ascending movement of water through floating polystyrene foam media of the contact clarification filter (CCF), it is clarified from colloidal particles of iron hydroxide due to their compressed sedimentation in the subfilter space of the CCF. The results of laboratory research on iron reduction when water deferrization for a certain period of time are given, the technological solution for the optimization of constructive and technological parameters of WT and CCF in the absence of repeated «charging» of the filter is offered. When a contact-clarifying filter is flushed it is recommended to leave a part of the  $G_{min}$  residue, which will serve as a catalyst during the next water deferrization cycle. A specific example shows that the quality of treated water depends on many design and technological parameters of the water treatment plant and the basic principles of its automation to ensure optimal operation and methods of calculating structures while minimizing capital and operating costs are proposed. The advantage of such an installation is the provision of high efficiency of water deferrization by biological method with full automation of water filtration and filter flushing while reducing the cost of its construction and operation.

**Key words:** aeration, bioreactor, water deferrization, iron bacteria, contact and clarification filter.