

С.Р. СТАСЮК, кандидат технічних наук  
Інститут водних проблем і меліорації НААН, м.Київ

## АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ І ЗМ'ЯКШЕННЯ ВОДИ ПРИ ЇЇ ВАПНУВАННІ ТА ВИСХІДНОМУ ФІЛЬТРУВАННІ ЧЕРЕЗ ПЛАВАЮЧЕ ЗАВАНТАЖЕННЯ

*Проаналізовано результати досліджень процесів знезалізнення і зм'якшення води при застосуванні методу вапнування з наступною обробкою води у відстійниках або на пінополістирольних фільтрах.*

**Ключові слова:** знезалізнення, зм'якшення, вапно, швидкість фільтрування води, пінополістирольні фільтри, брудомісткість фільтра, ефективність очищення води.

*Проанализированы результаты исследований процессов обезжелезивания и умягчения воды с применением метода известкования с последующей обработкой воды в отстойниках или на пенополистирольных фильтрах.*

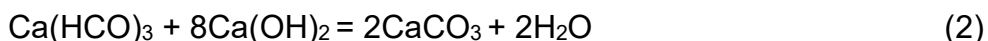
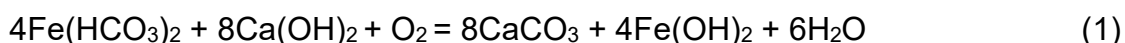
**Ключевые слова:** обезжелезивание, умягчение, известь, скорость фильтрования воды, пенополистирольные фильтры, грязеемкость фильтра, эффективность очистки воды.

*The results of researches about iron removal processes and water softening using lime method with the following water treatment in sedimentation tanks or polystyrene foam filters have been analyzed.*

**Key words:** iron removal, softening, lime, water filtration rate, polystyrene foam filters, filter dirt-holding capacity, water treatment efficiency.

**Постановка проблеми.** Як відомо [1] в локальних системах сільськогосподарського водопостачання застосовуються переважно підземні води, оскільки вони набагато чистіші від поверхневих, але в них є багато сполук заліза, марганцю і солей жорсткості (кальцію і магнію), що вимагає розробки дешевих, надійних і високоефективних водоочисних установок для їх використання в сільській місцевості.

Згідно існуючих нормативів [2] у питній воді заліза не повинно бути більше  $0,2 \text{ мг/дм}^3$ , а жорсткість не повинна перевищувати  $7 \text{ мг-екв/дм}^3$ . При сумісному знезалізненні і зм'якшенні води може застосовуватись реагентний метод очистки шляхом подачі розчину вапна  $\text{Ca(OH)}_2$  [3;4], при якому відбуваються хімічні реакції:



На видалення 1 мг двохвалентного заліза витрачається 2,64 мг вапна  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , і 0,14 мг кисню  $\text{O}_2$ , а доза вапна для зменшення жорсткості води визначається за формулою:

$$D_{\text{в}} = 28 \left( \frac{\text{CO}_2}{22} + \text{Ж}_{\text{к}} + 0,5 \right), \text{ мг/дм}^3 \quad (3)$$

де  $\text{CO}_2$  – концентрація у воді вільного вуглекислого газу, мг/дм<sup>3</sup>;  $\text{Ж}_{\text{к}}$  – карбонатна жорсткість води, мг-екв/дм<sup>3</sup>; 0,5 – надлишок вапна для забезпечення більшої повноти реакції, мг-екв/дм<sup>3</sup>.

В традиційних технологіях сумісного знезалізнення і зм'якшення підземних вод [3,4] застосовують аерацію води з наступною обробкою її реагентами та освітленням у тонкошарових відстійниках і швидких піщаних фільтрах. Ефективність очищення води залежить від множини факторів:

$$C_{\text{ф}} = f(C_{\text{в}}, d_{\text{е}}, K_{\text{н}}, H_{\text{ф}}, V_{\text{ф}}, D_{\text{р}}, t_{\text{ф}}, G_{\text{б}}) \quad (4)$$

де  $C_{\text{в}}$  і  $C_{\text{ф}}$  – якісні показники відповідно вихідної і фільтрованої води, мг/дм<sup>3</sup>;  $d_{\text{е}}$  – еквівалентний діаметр гранул фільтрувального завантаження, мм;  $K_{\text{н}}$  – коефіцієнт неоднорідності цього завантаження;  $H_{\text{ф}}$  – товщина фільтрувального шару завантаження, м;  $V_{\text{ф}}$  – швидкість фільтрування води, м/год;  $D_{\text{р}}$  – доза хімічних реагентів, що уводяться у вихідну воду, мг/дм<sup>3</sup>;  $t_{\text{ф}}$  – тривалість перебування реагентів у воді, хв;  $G_{\text{б}}$  – питома брудомісткість фільтрувального завантаження, кг/м<sup>2</sup>.

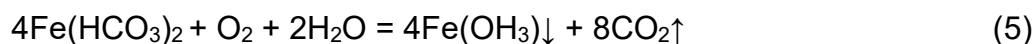
Оптимальним рішенням вважається таке, при якому забезпечується нормативна якість очищеної води при найменших капітальних і експлуатаційних витратах. При знаходженні цього оптимуму в багатофакторних залежностях (4) слід користуватися методикою раціонального планування експериментів [5].

Нині для знезалізнення підземних вод найбільшого поширення набув метод насичення вихідної води киснем шляхом спрощеної її аерації при падінні дрібних крапель води з висоти не менше 0,5 м. Але згідно [6, п.10.21.4] цей метод можна застосовувати лише при наступних показниках якості вихідної води:

- вміст сполук загального заліза – до 10 мг/дм<sup>3</sup>, у тому числі двовалентного ( $\text{Fe}^{2+}$ ) не менше ніж 70%;
- рН – не менше ніж 6,8;
- окисно – відновлювальний потенціал  $E_{\text{h}} > 100$  мВ;
- лужність – більше ніж 2 ммоль/дм<sup>3</sup>;
- вміст амонію – не більше 1,5 мг/дм<sup>3</sup>;
- перманганатна окиснюваність – не більше ( $0,15 \text{Fe}^{2+} + 3$ ), мгО/дм<sup>3</sup>;
- вміст метану – не більше 0,5 мг/дм<sup>3</sup>.

Гашене вапно  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , як найбільш дешевий реагент, широко використовується в технологіях очищення води для коригування її рН та зм'якшення води [7,8].

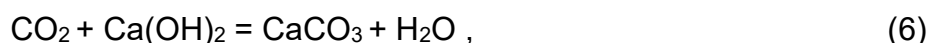
При аерації підземних вод, що вміщують двовуглекисле залізо  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ , процес його окиснення в трьохвалентну форму відбувається за таким рівнянням:



Процеси окиснення і гідролізу бікарбонату заліза уповільнюються виділенням вільної вуглекислоти  $\text{CO}_2$ , яка, утворюючи у воді вугільну кислоту  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , знижує величину рН води. Для прискорення процесу окиснення та гідролізу необхідно видаляти з води  $\text{CO}_2$  через повітровіддільник або уводити в неї вапно  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

При протіканні хімічних процесів за рівнянням (5) внаслідок гідролізу  $1 \text{ мг/дм}^3$  заліза  $\text{Fe}^{2+}$  збільшується вміст вільної вуглекислоти  $\text{CO}_2$  на  $1,6 \text{ мг/дм}^3$  та зменшується лужність води на  $0,036 \text{ ммоль/дм}^3$ .

При вапнуванні води зменшується концентрація в ній вуглекислоти  $\text{CO}_2$  за рівнянням:



що призводить до підвищення рН води, а отже і кращого протікання її знезалізнення.

Цей процес залежить від дози розчину вапна  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і часу перебування його у воді (табл.1).

Таблиця 1

**Залежність рН води від дози розчину вапна  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і часу перебування його у воді (при рН вихідної води – 6,5)**

Доза вапна $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , мг/дм <sup>3</sup>	рН після перебування вапна у воді $t$ , хв		
	5	10	15
2,5	7	7,6	8
3,5	7,7	8,1	8,4
4,5	8,3	8,4	8,8

Як видно з табл.1, із збільшенням дози вапна  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  і часу перебування його у воді  $t$ , рН води, а отже і ефективність її знезалізнення буде збільшуватись.

На окиснення  $1 \text{ мг Fe}^{2+}$  витрачається  $0,143 \text{ мг O}_2$ . Процес збагачення води киснем при її розбризуванні в повітрі проходить досить інтенсивно. При падінні крапель води з висоти  $0,5 \text{ м}$  вміст кисню у воді сягає  $5 \text{ мг/дм}^3$  [7], що є достатнім для окиснення  $5 : 0,143 = 35 \text{ мг/дм}^3 \text{ Fe}^{2+}$  у  $\text{Fe}^{3+}$ .

Оскільки температура підземних вод знаходиться в межах  $5...7^\circ\text{C}$ , то ступінь окиснення двовалентного заліза при спрощеній аерації води становить  $60...70\%$  [7]. Видаляти із води сполуки заліза і солі жорсткості

доцільно реагентним методом на установці для знезалізнення і зм'якшення води [9], методика розрахунку якої наведена у [4].

В ній відбуваються такі основні технологічні процеси (рис.1):

- аерація води з насиченням її киснем повітря;
- виділення газів з води (переважно  $\text{CO}_2$ ) для підвищення рН води, зменшення витрат вапна для зв'язування  $\text{CO}_2$  та виключення підфільтрової кольматації завантаження в контактному прояснювальному фільтрі (КПФ);
- забезпечення постійної швидкості фільтрування води на КПФ протягом фільтроциклу;
- подача розрахункової дози розчину вапна для знезалізнення і зм'якшення води;
- створення сприятливого середовища для закріплення залізобактерій, що ефективно переводять залізо з  $\text{Fe}^{2+}$  у  $\text{Fe}^{3+}$ ;
- здійснення висхідного руху води на КПФ через шар завислого осаду, що утримується від виносу з фільтрованою водою пінополістирольним завантаженням;
- утворення крупних пластівців та стиснене їх осідання у підфільтровому просторі КПФ.

В період фільтрування води при відкритих засувках **15,17-19** і **21** вихідна вода подається через аератор **3** на біофільтр **2**, де відбувається насичення її киснем  $\text{O}_2$  та видалення вуглекислоти  $\text{CO}_2$  через повітропропускні вікна **4**. На тонких нитках волокнистого завантаження **6**, що натягуються між колосниковими решітками **5**, закріплюються залізобактерії, що інтенсивно окиснюють  $\text{Fe}^{2+}$  у  $\text{Fe}^{3+}$ , споживаючи при цьому для своєї життєдіяльності енергію, що вивільняється. В оброблену воду по трубці **7** подається розрахункова доза розчину вапна і утворена суміш надходить в КПФ **8**, в якому рухається знизу догори. У підфільтровому просторі **9**, відбуваються складні фізико-хімічні і біологічні процеси:

- утворення і укрупнення пластівців з нерозчинних сполук  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  і  $\text{CaCO}_3$ ;
- стиснене осідання їх як в освітлювачі із завислим осадом в умовах безперервного збільшення концентрації цього активного мулу, що каталітично прискорює процес окиснення  $\text{Fe}^{2+}$  у  $\text{Fe}^3$  та флокуляції утворених частинок.

Як показали дослідження, виконані нами та іншими авторами [3,4,8], цей мул виконує основну роль у видаленні з води пластівців  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  і  $\text{CaCO}_3$ . Він являє собою полідисперсну систему, в якій швидкість осадження пластівців залежить від їхньої крупності, об'ємної концентрації і швидкості висхідного фільтрування води. Ефективність очищення води залежить від кількості цього завислого осаду, що припадає на  $1 \text{ м}^2$  площі фільтруючої поверхні КПФ, тобто питомої брудомісткості фільтра  $G_6$ . Очищена вода відповідає нормативним вимогам, коли питома брудомісткість КПФ знаходиться в межах між її мінімальними  $G_{6.\text{min}}$  та максимальними  $G_{6.\text{max}}$  значеннями.

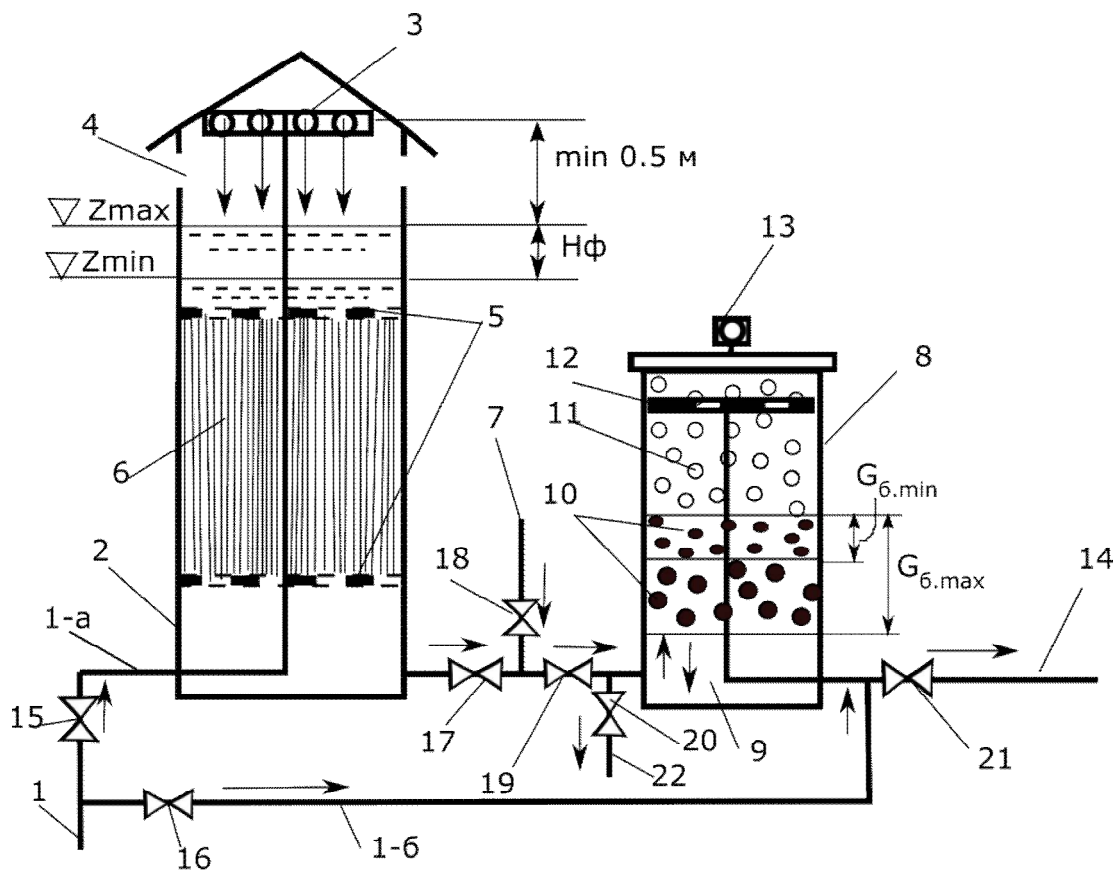


Рис. 1. Технологічна схема знезалізнення і зм'якшення підземних вод на установці конструкції ІВПіМ НААН:

**1** – подача води із свердловини; **1а** – на очищення; **1б** – на промивку фільтра; **2** – біореактор, повітровіддільник і регулятор швидкості фільтрування води; **3** – аератор; **4** – повітропропускні вікна; **5** – колосникові решітки; **6** – волокнисте завантаження; **7** – подача розчину вапна; **8** – контактний прояснювальний фільтр; **9** – підфільтровий простір; **10** – активний мул; **11** – пінополістирольне фільтрувальне завантаження; **12** – ковпачковий дренаж; **13** – вантуз; **14** – відведення очищеної води; **15-21** – засувки; **22** – скидання промивної води з контактного прояснювального фільтра

При промиванні КПФ в його підфільтровому просторі слід залишати осад у кількості, що відповідає мінімальній питомій брудомісткості фільтра  $G_{б.min}$  для забезпечення нормативної якості очищеної води в наступному фільтроциклі роботи КПФ. Не можна погодитись з авторами статті [10], що «при промиванні у підфільтровому просторі слід обов'язково залишати шар завислого осаду висотою приблизно 0,2 м». Цей шар вимірюється в  $кг/м^2$  і його величина залежить від таких основних факторів:

- якості вихідної води (вміст заліза, солей жорсткості, рН, Eh тощо);
- дози розчину вапна  $Ca(OH)_2$ ;
- швидкості фільтрування води  $V_{ф}$ , м/год;
- конструктивних параметрів КПФ ( $d_e$ ,  $K_n$ ,  $H_{ф}$ ).

Максимальна питома брудомісткість КПФ визначає час закінчення фільтрування води і початок його промивання, інтенсивність  $q_{\text{пр}}$  і тривалість  $t_{\text{пр}}$  якого має бути розрахована з умови зменшення питомої брудомісткості КПФ від  $G_{\text{б.мак}}$  до  $G_{\text{б.мін}}$ , після чого фільтроцикл продовжується.

### Висновки

При вапнуванні підземних вод, що мають підвищений вміст заліза і солей жорсткості відбувається не тільки зм'якшення води, але й підвищується рН води, що забезпечує зростання ефективності процесів її знезалізнення при використанні спрощеної аерації шляхом розбризкування вихідної води на дрібні краплі. Ці процеси ефективно здійснюються на установці конструкції ІВПіМ НААН.

### Список літератури

1. Хоружий П.Д. Ресурсозберігаючі технології водопостачання / П.Д. Хоружий, Т.П. Хомутецька, В.П. Хоружий. К.: Аграрна наука, 2008. 534 с.
2. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. МОЗУ 12.05.2010, № 400. МІОУ 01.07.2010, № 452/17747.
3. Николадзе Г.И. Технология очистки природных вод: Учеб. для вузов / Г.И. Николадзе. М.: Высшая школа, 1987. 479 с.
4. Стасюк С.Р. Розрахунок установок для знезалізнення і зм'якшення підземних вод в системах сільськогосподарського водопостачання / С.Р. Стасюк, Т.П. Хомутецька, П.Д. Хоружий. Меліорація і водне господарство, 2015, вип.102. С.20-24.
5. Протодьяконов М.М. Методика рационального планирования экспериментов / М.М. Протодьяконов, Р.И. Тедер. М.: Наука, 1970. 76 с.
6. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. К, 2013. 172 с.
7. Клячко В.А. Очистка природных вод / В.А. Клячко, И.А. Апельцин. М.: Стройиздат, 1971. 578 с.
8. Юрков Є.В. Знезалізнення води з використанням лугомістких реагентів / Є.В. Юрков, В.А. Потієнко, О.Д. Юрков. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Наук.-техн. зб. Вип.27. К.: КНУБА, 2016. С.445-450.
9. Патент на корисну модель №85009. Установа для знезалізнення і зм'якшення води / Стасюк С.Р., Хомутецька Т.П., Хоружий П.Д. Бюл.№21, 11.11.2013р.
10. Ковальчук В.А. Застосування методу вапнування на пінополістирольних фільтрах із зростаючим шаром завислого осаду в схемах водопідготовки промислових підприємств / В.А. Ковальчук, Л.М. Одуд. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Наук.-техн. зб. Вип.27. К.: КНУБА, 2016. С.163-169.

Стаття надійшла до редакції 13.05.17