

## РОЗРАХУНОК ПОВІТРЯВСМОКТУВАЛЬНИХ СИСТЕМ В НАПІРНИХ ВОДОЗНЕЗАЛІЗНЮВАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

**Т.П. Хомуцька, П.Д. Хоружий, О.В. Рубан**  
Інститут водних проблем і меліорації НААН, м. Київ  
e-mail: itsk@bigmir.net

*У статті розглянуто фактори, що впливають на ефективність видалення заліза з підземних вод, описано конструкцію повітрявсмоктувальної системи напірної водознезалізнювальної установки і наведено методуку її розрахунку.*

*Ключові слова: знезалізнення води, напірна установка, засмокування повітря, ежектор, н'езометричний напір.*

### Вступ

Як відмічається в роботі [1], в підземних водах України (більше 50%) знаходиться підвищений вміст загального заліза, у тому числі в 33% вод зафіксовано перевищення нормативу [2] більше, ніж у 10 разів.

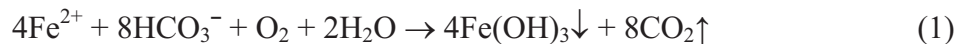
Вживання води з підвищеним вмістом заліза негативно впливає на стан здоров'я людини і призводить до тяжких захворювань [3].

Ефективність процесів видалення розчинного заліза ( $\text{Fe}^{2+}$ ) залежить від багатьох факторів [1]: Eh і рН води, йонного складу, наявності гумінових речовин та залізобактерій тощо.

### Вибір методу знезалізнення води

При виборі методу знезалізнення води необхідно враховувати особливості фізико-хімічних перетворень, що відбуваються при різних умовах.

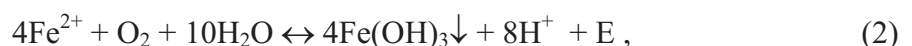
При окисленні заліза киснем повітря в присутності гідрокарбонатів хімізм процесу має вигляд:



Швидкість окислення  $\text{Fe}^{2+}$  значно зростає при контакті води з гідроксидом заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  та збільшенні рН води [4]. При цьому ефективність знезалізнення води протягом фільтроциклу зростає, оскільки утворюваний при цьому процесі гідроксид заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  прискорює окислення  $\text{Fe}^{2+}$ .

Залізо, що знаходиться у воді, згідно з класифікацією, запропонованою П.А.Кульським, відноситься до домішок II і IV груп. Видалення розчинених у воді домішок IV групи ( $\text{Fe}^{2+}$ ) з лінійними розмірами  $10^{-7} - 10^{-8}$  см здійснюється окисленням при переведенні їх в гетерогенну систему, що включає малорозчинні сполуки розмірами  $10^{-5} - 10^{-6}$  см (домішки II групи з  $\text{Fe}^{3+}$ ). Наступне видалення цих домішок може здійснюватись за допомогою сил гравітації у відстійниках або сил адгезії на фільтрах.

За останні роки в Німеччині та Франції перевагу віддають біологічному методу знезалізнення води [6-10], який має ряд суттєвих переваг порівняно з фізико-хімічним методом, що полягають у тому, що специфічні залізобактерії *Gallionella ferruginea* досить швидко окислюють  $\text{Fe}^{2+}$ , а отриманий гідроксид заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  накопичують у компактній формі. Цей процес описується реакцією [10]:



де E – енергія, що вивільнюється та використовується для життєдіяльності мікроорганізмів.

Для біологічного знезалізнення підземних вод необхідно виконувати такі умови:

- насичення вихідної води киснем здійснювати у точній відповідності стехіометричній кількості, тобто на окислення 1 мг  $\text{Fe}^{2+}$  за реакцією (2) витрачається 0,143 мг  $\text{O}_2$ ;
- створити сприятливе середовище для закріплення у фільтрувальному завантаженні залізобактерій.

### Подача повітря в напірні водознезалізнювальні установки

В локальних системах водопостачання знезалізнення води доцільно виконувати на напірних установках з волокнистими і пінополістирольними фільтрами [11], в яких можна легко створювати умови для видалення заліза біологічним методом.

В напірних водоочисних системах подачу кисню у вихідну воду можна здійснювати повітрядувками. Але це ускладнює експлуатацію системи і збільшує капітальні і експлуатаційні витрати [12]. Тому для цього процесу доцільно використовувати [13] кінетичну енергію насосів першого підняття для засмоктування повітря у вихідну воду за допомогою місцевого звуження (ежектора), принцип роботи якого показано на рис. 1.

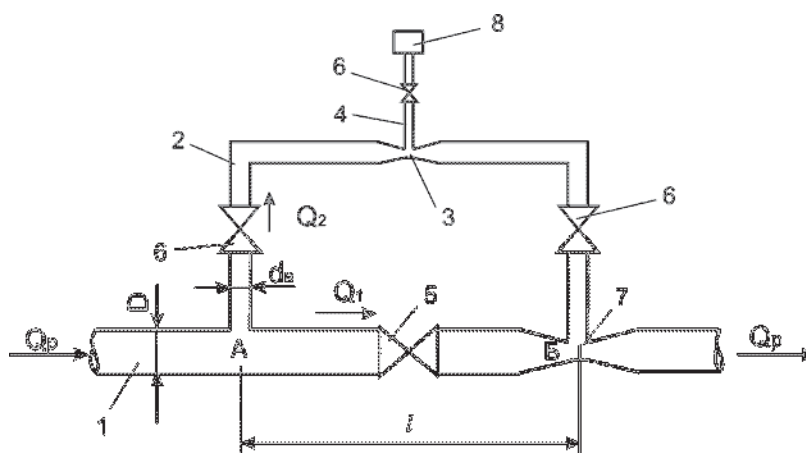


Рис.1. Схема роботи повітрявсмоктувальної системи:

1 – основний напірний трубопровід; 2 – відгалуження; 3 – ежектор; 4 – повітрявсмоктувальна трубка; 5 – засувка; 6 – вентилі; 7 – сопло; 8 – ротаметр.

### Методика розрахунку повітрявсмоктувальних систем

Для всмоктування атмосферного повітря необхідно створити на звуженій ділянці 3 відгалуження 2 вакуум, величина якого визначається [13] за формулою:

$$h_{\text{вак}} = \frac{8Q_2^2}{g\pi^2 d_0^4} \left( 1 - \frac{d_0^4}{d_B^4} \right) - h, \text{ м}, \quad (4)$$

де  $Q_2$  – витрата води по відгалуженню 2,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$  – прискорення вільного падіння;  $d_B$  і  $d_0$  – діаметр відповідно відгалуження 2 і ежектора 3, м;  $h$  – п'езометричний напір у відгалуженні 2 перед ежектором 3, м.

Нехтуючи значенням малої величини  $d_0^4/d_B^4$ , отримаємо вирази для визначення величини діаметра звуженої ділянки трубопроводу (ежектора)  $d_0$  і швидкості руху води в ній  $V_{c,1}$ :

$$d_0 = 2 \cdot \sqrt{\frac{Q_2}{\pi \sqrt{2g(h + h_{\text{вак}})}}}, \text{ м}; \quad (5)$$

$$V_{c,1} = \sqrt{2g(h + h_{\text{вак}})}, \text{ м}/\text{с}. \quad (6)$$

З формули (6) видно, що величина вакууму в ежекторі визначається за формулою:

$$h_{\text{вак}} = \frac{V_{c.1}^2}{2g} - h, \text{ м.} \quad (7)$$

Для утворення вакууму в ежекторі фактична швидкість руху води у звуженій частині повинна перевищувати величину:

$$V_{c.i} > V_{\text{кр}}, \quad (8)$$

де  $V_{\text{кр}}$  – критична швидкість в ежекторі, при якій у повітрявсмоктувальній трубці 4 (рис.1) встановлюється атмосферний тиск.

Величина  $V_{\text{кр}}$  визначається за формулою [13]:

$$V_{\text{крит}} = \sqrt{V_a^2 + 2gh}, \text{ м/с,} \quad (9)$$

де  $V_a$  – швидкість руху води у відгалуженні 2 (рис.1), м/с;  $h$  – п'єзометричний напір у цій трубці перед ежектором, м.

На рис. 2 показано залежність  $V_{\text{кр}} = f(h)$  при  $V_a = 1$  м/с.

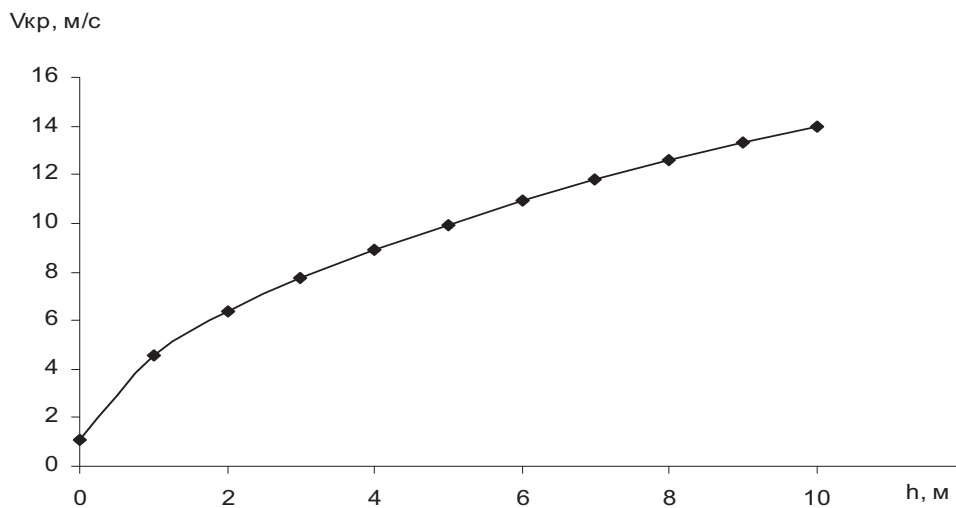


Рис.2. Графік залежності  $V_{\text{кр}} = f(h)$  при  $V_a = 1$  м/с.

При збільшенні цієї швидкості у два рази величина  $V_{\text{кр}}$  зростає всього на 0,5%.

Витрата всмоктуваного ежектором повітря залежить від величини вакууму у горловині та діаметру всмоктувальної труби [13]:

$$Q_n = \frac{\pi d_{\text{тр}}^2}{4} \sqrt{\frac{h_{\text{вак}} 19600}{\alpha \rho}}, \text{ м}^3/\text{с,} \quad (10)$$

де  $d_{\text{тр}}$  – діаметр всмоктувальної трубки, м;  $h_{\text{вак}}$  – вакуум у горловині ежектора, м;  $\alpha$  – коефіцієнт Коріоліса, який враховує нерівномірність розподілення швидкостей по перерізу труби;  $\rho$  – густина повітря в стандартних умовах, кг/м<sup>3</sup>.

Приймаємо:  $\pi = 3,14$ ;  $\alpha = 1,06$ ;  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup>.

Отже, знаючи потрібну кількість повітря, яку повинен засмоктати ежектор  $Q_n$ , та вакуум у його горловині, можна визначити розрахунковий діаметр повітрявсмоктувальної трубки за формулою:

$$d_{\text{тр}} = \frac{101,3\sqrt{Q_n}}{\sqrt[4]{h_{\text{вак}}}}, \text{ мм.} \quad (11)$$

При знезалізненні підземних вод потрібна витрата всмоктуваного ежектором повітря визначається за формулою:

$$Q_n = 0,001\text{Fe}^{2+} \cdot D \cdot Q_p, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (12)$$

де  $\text{Fe}^{2+}$  – вміст заліза у вихідній воді, мг/дм<sup>3</sup>;  $D = 2$  дм<sup>3</sup>/г – об'єм повітря на окислення 1 г двовалентного заліза [14];  $Q_p$  – розрахункова витрата вихідної води, м<sup>3</sup>/с.

Витрата засмоктуваного ежектором повітря вимірюється ротаметром 8 (рис. 1).

Витрата води у трубці, що підключена до ежектора, визначається за формулою:

$$Q_2 = \frac{Q_p \sqrt{S_1}}{\sqrt{S_1} + \sqrt{S_2}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (13)$$

де  $Q_p$  – розрахункова витрата води по основному трубопроводу, м<sup>3</sup>/с;  $S_1$  і  $S_2$  – гідравлічні опори відповідно ділянки основного трубопроводу довжиною  $l$  між точками А і Б (рис.1) та відгалуження 2 між цими точками для встановлення ежектора, с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>.

Значення гідравлічних опорів  $S_1$  і  $S_2$  регулюються засувкою 5 та вентилями 6 (рис.1) для забезпечення розрахункових величин  $Q_2$ ,  $h$  і  $V_{c.1}$ , а отже і  $h_{\text{вак}}$  і  $Q_n$ .

При  $V_b = 1$  м/с діаметр труби, що підключена до місцевого звуження, визначається за формулою:

$$d_b = 1,13\sqrt{Q_2}, \text{ м.} \quad (14)$$

На основному напірному трубопроводі 1 (рис.1) у точці приєднання другого кінця відгалуження 2 (точка Б) потрібно встановлювати місцеве звуження труби (сопло) 7 для вирівнювання тиску води в основному трубопроводі 1 і відгалуженні 2, тобто для забезпечення сумісної роботи цих трубопроводів.

Отже, повинна виконуватись умова:

$$h' + \frac{V_{c.2}^2}{2g} = H + \frac{V_T^2}{2g}, \text{ м}, \quad (15)$$

де  $H$  і  $h'$  – п'езометричний напір води, відповідно у трубах 1 і 2 перед соплом 7, м;  $V_{c.2}$  і  $V_T$  – швидкість руху води, відповідно у соплі 7 і трубці 1, м/с.

З виразу (15) бачимо, що швидкість руху води у соплі 7 буде

$$V_{c.2} = \sqrt{V_T^2 + 2g(H-h)}, \text{ м/с.} \quad (16)$$

Оскільки витрата води у трубці 1 дорівнює  $Q_1$ , то

$$V_{c.2} = \frac{4Q_1}{\pi d_c^2}, \text{ м/с}, \quad (17)$$

де  $d_c$  – діаметр сопла, м.

Приймаємо швидкість руху води в трубці 1  $V_T = 1$  м/с. Тоді діаметр сопла визначається за формулою

$$d_c = 1,13 \cdot \sqrt[4]{\frac{Q_1^2}{1+19,6(H-h)}}, \text{ м.} \quad (18)$$

### Приклад розрахунку

Потрібно розрахувати повітрявсмоктувальну систему для подачі кисню в напірну водознезалізнювальну установку при таких вихідних даних: розрахункова витрата води по основному напірному трубопроводу  $Q_p = 72 \text{ м}^3/\text{год} = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ ; вміст двовалентного заліза у вихідній воді становить  $\text{Fe}^{2+} = 4 \text{ мг}/\text{дм}^3$ . Витрата води у відгалуженні 2 становить  $Q_2 = 0,1 Q_p = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$ , а п'єзометричний напір перед ежектором  $-h = 5 \text{ м}$ .

#### Розв'язання

Потрібна витрата повітря для окислення двовалентного заліза за формулою (12) дорівнює  $Q_n = 0,001 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 0,02 = 0,00016 \text{ м}^3/\text{с}$ .

За формулою (9) визначаємо критичну швидкість руху води в горловині ежектора при швидкості руху води у відгалуженні  $V_b = 1 \text{ м}/\text{с}$  і п'єзометричному напорі  $h = 5 \text{ м}$

$$V_{\text{ед}} = \sqrt{1 + 19,6 \cdot 5} = 9,95 \text{ м}/\text{с}.$$

Приймаємо швидкість руху води у звуженій частині ежектора  $V_{c,1} = 10 \text{ м}/\text{с}$  і за формулою (7) визначаємо величину вакууму в ежекторі

$$h_{\text{вак}} = \frac{100}{19,6} - 5 = 0,1 \text{ м}.$$

За формулою (11) визначаємо діаметр повітрявсмоктувальної трубки

$$d_{\text{тр}} = \frac{101,3 \sqrt{0,00016}}{\sqrt[4]{0,1}} = 2,3 \text{ мм}.$$

Діаметр горловини місцевого звуження визначаємо за формулою (5) з урахуванням виразу (6):

$$d_0 = 2000 \cdot \sqrt{\frac{0,002}{3,14 \cdot 10}} = 16 \text{ мм},$$

а діаметри основного трубопроводу 1 (рис. 1) і відгалуження 2 при швидкостях руху води  $V_b = 1 \text{ м}/\text{с}$  і витратах води відповідно  $Q_p = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$  і  $Q_2 = 0,002 \text{ м}^3/\text{с}$  за формулою (14):

$$D = 1130 \sqrt{0,02} = 150 \text{ мм} \quad \text{і} \quad d_b = 1130 \sqrt{0,002} = 50 \text{ мм}.$$

Витрата води по трубці 1 до сопла 7 дорівнює  $Q_1 = 0,018 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Приймаємо п'єзометричний напір у відгалуженні перед соплом  $h' = 4 \text{ м}$  і у трубці 1  $H = 50 \text{ м}$ .

Тоді діаметр сопла за формулою (18)

$$d_c = 1,13 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,018^2}{1 + 19,6(50 - 4)}} = 0,028 \text{ м} = 28 \text{ мм}.$$

### Висновки

В локальних системах водопостачання знезалізнення підземних вод доцільно виконувати на напірних установках при застосуванні біологічних методів видалення з води заліза та використанні кінетичної енергії артезіанських насосів для засмокування атмосферного повітря і подачі його у розрахунковій кількості у вихідну воду.

Для біологічного знезалізнення підземних вод необхідно насичувати воду киснем повітря у стехіометричній кількості і створювати сприятливі умови для закріплення залізобактерій, що ефективно здійснюється на установках з волокнистими і пінополістирольними фільтрами.

Розрахунок елементів повітрявсмоктувальних систем напірних водознезалізнювальних установок доцільно виконувати по запропонованій методиці, в основу якої покладено використання кінетичної енергії насосів першого підняття.

## РАСЧЕТ ВОЗДУХОВСАСЫВАЮЩИХ СИСТЕМ В НАПОРНЫХ ВОДООБЕЗЖЕЛЕЗИВАЮЩИХ УСТАНОВКАХ

**Т.П. Хомуецкая, П.Д. Хоружий, О.В. Рубан**  
Институт водных проблем и мелиорации НААН, г. Киев  
e-mail: itsk@bigmir.net

*В статье рассмотрены факторы, влияющие на эффективность удаления железа из подземных вод, описана конструкция воздухоподсасывающей системы напорной водообезжелезивающей установки и приведена методика ее расчета.*

*Ключевые слова: обезжелезивание воды, напорная установка, всасывание воздуха, эжектор, пьезометрический напор.*

## CALCULATION OF SUCKS AIR SYSTEMS IN THE PLANT FOR REMOVING IRON FROM WATER

**T. Khomutetska, P. Khoruzhiy, O. Ruban**  
Institute of Water Problems and Land Reclamation, Kiev  
e-mail: itsk@bigmir.net

*The paper considers the factors affecting the efficiency of iron removal from groundwater, described construction of a suction air system in the plant for removing iron from water and shows the method of its calculation.*

*Key words: removal of iron from the water, lifting unit, suction air, ejector, the piezometric pressure.*

### Список літератури:

1. Мітченко Т. Є. Особливості фізико-хімічних перетворень сполук феруму в підземних водах / Т. Є.Мітченко, Є. О. Орестов, З. В.Малецький // Вода і водоочисні технології. — 2011. — № 1(3). — С. 4 — 11.
2. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною: ДСанПіН 2.2.4-171-10 – [Чинний від 2010-05-12]. — К. : Ліга: Закон, 2010.
3. Орлов В. О. Аераційні методи знезалізнення води / В. О. Орлов, С. Ю. Матринов // Вода і водоочисні технології. — 2011. — № 2(4). — С. 42 — 52.
4. Фрог Б. Н. Водоподготовка: учебное пособие для вузов / Б. Н.Фрог, А. П.Левченко. — М. : Изд. МГУ, 1996. — 680 с.
5. Кульский Л. А. Технология очистки природных вод / Л. А. Кульский, П. П. Строкач. — К. : Высшая школа, 1986. — 352 с.
6. Grochmann A. Biologische enteisenung und entmanganung eines methanhaltigen grundwasser in speyir / A. Grochmann, R. Gollasch, G. Chumacher // GWF. Wasser, Abwasser, 1989. — 9. — S. 441 — 447.

7. *Badjo I. Technologies appropriées. L'exemple d'une grande installation de deferrisation biologique au Togo / I. Badjo, P. Mouches // 1990. — т. 38, № 3. — Р. 197 — 206.*
8. *Хоружий П. Д. Исследование процессов и разработка технологии обезжелезивания воды с помощью железобактерий / П. Д. Хоружий, Т. П. Хомутецкая, В. П. Хоружий // Химия и технология воды, 2003. — т. 25. — № 5. — С. 465 — 475.*
9. *Хоружий П. Д. Ресурсозберігаючі технології водопостачання / П. Д. Хоружий, Т. П. Хомутецька, В. П. Хоружий. — К. : Аграрна наука, 2008. — 534 с.*
10. *Fnkrah D.A. A review of biological iron removal / Daniel A. Ankras, Erik G.Sogaard // Thirteenth International Egyptian Water Technology Conference, IWTC 132009. — Hurghada, Egypt, 2009. — Р. 999 — 1005.*
11. Патент України на корисну модель № 60063 / Напірна установка для знезалізнення води / Хоружий П. Д., Хомутецька Т. П., Хоружий В. П., Рубан О. В. Заявка. 18.11.2010. Опубл. 10.06.2011. Бюл. № 11, 2011.
12. *Мамонтов К. А. Обезжелезивание воды в напорных установках. — М. : Стройиздат, 1964. — 94 с.*
13. *Смыслов В. В. Гидравлика и аэродинамика. — Киев: Вища школа, 1979. — 336 с.*
14. СНиП 2.04.02-84 . Водоснабжение. Наружные сети и сооружения / Госстрой СССР. — М.: Стройиздат, 1985. — 136 с.