

ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ВОДИ НА НАПІРНИХ УСТАНОВКАХ

П.Д. ХОРУЖИЙ, Т.П. ХОМУТЕЦЬКА, В.П. ХОРУЖИЙ, О.В. РУБАН

Інститут гідротехніки і меліорації НААН

Запропоновано нову конструкцію напірної установки для знезалізнення підземних вод і методику її розрахунку.

Ключові слова: підземні води, знезалізнення, напірна установка, сільськогосподарське водопостачання

Актуальність і стан вивчення питання. В ІГіМ НААН за останні 15 років успішно ведуться наукові дослідження процесів знезалізнення підземних вод. Розроблено низку нових конструкцій водознезалізнювальних установок, які запатентовано в Україні і Російській Федерації. Серед них найбільшого

© П.Д. Хоружий, Т.П. Хомуцька, В.П. Хоружий, О.В. Рубан, 2010
Меліорація і водне господарство. 2010. Вип. 98

поширення набули баштові установки [1], які працюють у напірному режимі, вмщують регулювальний і протипожежний запаси води, забезпечують очищення води до питної якості і не потребують підкачувальних та промивних насосів.

Проте у випадках, коли відсутня водонапірна башта, для невеликих локальних сільськогосподарських об'єктів водопостачання виникає потреба знезалізнювати воду на напірних автоматизованих установках. Різні типи таких установок розроблено в ІГіМ НААН [2, 3], а методику розрахунку їх наведено в [4, 5].

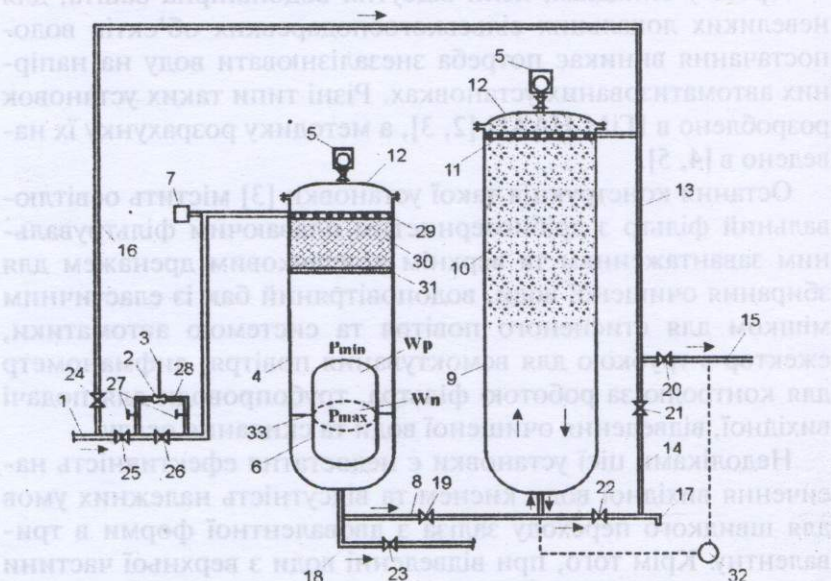
Остання конструкція такої установки [3] містить освітлювальний фільтр з дрібнозернистим плаваючим фільтрувальним завантаженням та верхнім ковпачковим дренажем для збирання очищеної води, водоповітряний бак із еластичним мішком для стисненого повітря та системою автоматики, ежектор з трубкою для всмоктування повітря, дифманометр для контролю за роботою фільтра, трубопроводи для подачі вихідної, відведення очищеної води та скидання осаду.

Недоліками цієї установки є недостатня ефективність насичення вихідної води киснем та відсутність належних умов для швидкого переходу заліза з двовалентної форми в тривалентну. Крім того, при відведенні води з верхньої частини водоповітряного бака частина газів надходить з водою у підфільтровий простір освітлювального фільтра, створюючи в ньому пухирцеву кольматацію, а для промивання фільтра не вистачає напору води після водоповітряного бака.

Завдання, методика і результати наукових досліджень. Нами запропоновано нову конструкцію напірної установки для знезалізнення води, в якій відмічені недоліки усунуто шляхом обладнання водоповітряного бака новими елементами та удосконалення системи трубопроводів для подачі вихідної води у водоповітряний бак, відведення її на освітлювальний фільтр та подачі води на промивання фільтра (рисунок).

У напірній установці для знезалізнення води водоповітряний бак 4 і освітлювальний фільтр 9 обладнано верхніми кришками 12 з вантузами 5, що забезпечує зручність експлуа-

тації. У верхній частині водоповітряного бака встановлено біореактор з волокнистим завантаженням 30 між водорозподільною системою 29 і колосниковою решіткою 31, а нова система подачі води на фільтр забезпечує якісне очищення води і промивання фільтра.



Напірна водознезалізнювальна установка:

- 1 – подача вихідної води; 2 – ежектор; 3 – трубка для всмоктування повітря; 4 – водоповітряний бак; 5 – вантуз; 6 – еластичний мішок із стисненим повітрям; 7 – система автоматики; 8 – подача води на фільтрування; 9 – напірний фільтр; 10 – плаваюче пінополістирольне завантаження; 11 – верхній дренаж з водозабірними ковпачками; 12 – кришка; 13 – відведення фільтрованої води; 14 – скидання першого фільтрату; 15 – подача води споживачам; 16 – подача води на промивання фільтра; 17 – скидання промивної води; 18 – випуск води із бака; 19–26 – засувки; 27 – вентиля; 28 – відгалуження; 29 – водорозподільна система; 30 – біореактор з волокнистим завантаженням; 31 – колосникова решітка; 32 – дифманометр; 33 – кріплення еластичного мішка

Установка працює наступним чином. Вихідна вода від джерела водопостачання по трубопроводу 1 надходить у водоповітряний бак 4 через водорозподільну систему 29, біореактор з волокнистим завантаженням 30 і колосникову решітку 31. Засмоктане ежектором 2 атмосферне повітря збагачує киснем вихідну воду, а іммобілізовані на волокнистому завантаженні біореактора 30 специфічні залізобактерії швидко переводять двовалентне залізо у тривалентну форму, утворюють пластівці з гідроксиду заліза. В напірному баку проходить процес видалення з води різних газів через вантуз 5 для запобігання пухирцевій кольматації підфільтрового простору в напірному фільтрі 9. Система автоматики 7 підтримує тиск води в трубах в розрахункових межах, включаючи насос при мінімальному тиску P_{\min} і виключаючи його при максимальному P_{\max} . Дегазована вода з дрібними пластівцями з гідроксиду заліза з нижньої частини напірного бака 4 по трубопроводу 8 надходить на фільтр 9, де при висхідному фільтруванні води виникають сприятливі умови для її глибокого освітлення. Фільтровану воду збирають верхнім ковпачковим дренажем 11 і відводять по трубі 13. Після промивання фільтра спочатку скидають перший фільтрат по трубі 14 у каналізацію, а потім подають очищену воду споживачам по трубі 15. Контроль за втратами напору у фільтрі здійснюють дифманометром 32. При досягненні їхньої граничної величини фільтр промивають. Для цього закривають засувки 19, 25 і 20 і відкривають засувки 24 і 22. Вода, рухаючись у зворотному напрямку під значно більшим напором, розширює пінополістирольне завантаження 10 і вимиває з нього забруднення, які трубопроводом 17 скидають у каналізацію. Після промивання фільтра закривають засувки 24 і 22, відкривають засувки 25, 19, 21, а потім 20 і фільтроцикл повторюють.

Перевага запропонованої установки полягає у забезпеченні високої якості очищеної води, надійності роботи установки, зручності її експлуатації та зменшенні собівартості очищеної води.

При проектуванні таких установок необхідно виконувати розрахунки повітровсмоктувальної системи, водоповітряного бака і освітлювального фільтра.

Розрахунок повітровсмоктувальної системи ведуть у такій послідовності [4, 5]:

1. Приймають величину витрати води у відгалуженні за формулою:

$$Q_v = (0,2-0,3) Q_p, \quad (1)$$

де Q_p – розрахункова витрата води водознезалізнювальної установки, м³/с.

2. Визначають діаметри трубопроводів 1 і 28 відповідно із формул

$$D_p = 1,13\sqrt{Q_p}, \text{ м}; \quad (2)$$

$$D_p = 1,13\sqrt{Q_p}, \text{ м}. \quad (3)$$

3. Приймають значення п'єзометричного тиску перед соплом 2 у межах $h = 1-8$ м і потрібного вакууму в соплі $h_{\text{вак}} = 0,05$ м. Потрібну величину h досягають за допомогою вентилів 27.

4. Визначають діаметр сопла 2 за формулою:

$$d_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{Q_v}{\pi \sqrt{2g(h + h_{\text{вак}})}}, \text{ м} \quad (4)$$

5. Обчислюють потрібну витрату всмоктуваного повітря з формули:

$$Q_n = 0,002Q_p \cdot \text{Fe}^{2+}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5)$$

де Fe^{2+} – вміст двовалентного заліза у вихідній воді, мг/дм³.

6. Визначають діаметр повітровсмоктувальної трубки 3 за формулою:

$$d_{\text{тр}} = \frac{101,3\sqrt{Q_n}}{\sqrt[4]{h_{\text{вак}}}}, \text{ мм}. \quad (6)$$

7. Перевіряють витрату повітря через трубку 3 прийнятого стандартного діаметра з формули:

$$Q_n = 97,44d_{\text{тр}}^2\sqrt{h_{\text{вак}}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (7)$$

де $d_{\text{тр}}$ і $h_{\text{вак}}$ – прийняті відповідно діаметр повітровсмоктувальної трубки і вакуум у соплі, м.

Водоповітряний бак 4 має у даній водознезалізнювальній установці такі призначення:

- регулювання нерівномірності подачі води в установку із свердловини і водовідбору з неї споживачами;
- забезпечення необхідного тиску в системі при подачі води споживачам;
- створення необхідних умов для швидкого окислення заліза з переходом його з двовалентної Fe^{2+} у тривалентну Fe^{3+} форму.

Регульований об'єм води в баку призначений для забезпечення подачі води споживачам у момент, коли робочий насос, що подає воду в бак, не працює. Цей об'єм створюється у баку внаслідок стиснення еластичного мішка б з повітрям. При тиску P_{\min} робочий насос за допомогою реле автоматики 7 включається, вода надходить у бак, еластичний мішок б стискається, тиск у баку підвищується до величини P_{\max} , при якому насос відключається.

Регульований об'єм води в баку, що дорівнює об'єму повітря в еластичному мішку б між значеннями тиску P_{\min} і P_{\max} , визначається за формулою

$$W_p = \frac{Q_n}{4n}, \text{ м}^3, \quad (8)$$

де Q_n – середня подача насоса за період між його вмиканням і вимиканням, $\text{м}^3/\text{год}$; n – кількість вмикань насоса за годину, $1/\text{год}$.

Робочий насос, що подає воду на установку, підбирають за витратою:

$$Q_n = Q_{\max \text{ год}}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (9)$$

де $Q_{\max \text{ год}}$ – витрата води по трубопроводу 15 в годину максимального водоспоживання, $\text{м}^3/\text{год}$.

Допустиму кількість вмикань насоса за годину приймають за паспортними даними системи автоматики. Орієнтовно можна приймати $n = 5-10$ $1/\text{год}$.

Об'єм еластичного мішка б при тиску води в баку P_{\min} визначається за формулою:

$$W_m = W_p + W_n, \text{ м}^3, \quad (10)$$

де W_n — об'єм повітря, стиснутого в еластичному мішку при тиску P_{\max} :

$$W_n = \frac{W_p}{\varepsilon - 1}, \text{ м}^3, \quad (11)$$

де ε — відношення максимального абсолютного тиску у водоповітряному баку до мінімального абсолютного тиску в ньому:

$$\varepsilon = \frac{P_{\max} + 0,098}{P_{\min} + 0,098}. \quad (12)$$

Величину ε приймають у межах $\varepsilon = 1,33-2$.

Мінімальний тиск у водоповітряному баку визначається з формули

$$P_{\min} = \frac{H_b + \sum h - \Delta Z}{102}, \text{ МПа}, \quad (13)$$

де H_b — необхідний вільний напір у водоспоживачів, м; $\sum h$ — сума втрат напору від водоповітряного бака до диктуючої точки водоспоживачів:

$$\sum h = h_k + h_\phi + h_b + h_m, \text{ м}, \quad (14)$$

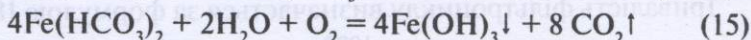
де h_k , h_ϕ , h_b і h_m — втрати напору відповідно в комунікаціях водоочисної установки, освітлювальному фільтрі, водоводі та водопровідній мережі, м; ΔZ — різниця між геодезичними відмітками місць розташування водоповітряного бака і диктуючої точки, м.

У формулі (14) втрати напору в освітлювальному фільтрі h_ϕ необхідно приймати з найбільшим його значенням, тобто перед промиванням фільтра, яке для пінополістирольного фільтрувального завантаження можна приймати $h_\phi = 1$ м, а величину $h_k = 2$ м.

Втрати напору у водоводі h_b залежать від його діаметра, довжини, матеріалу труб і витрат води, які в розрахунках приймають для години максимального водоспоживання. Втрати напору у водопровідній мережі h_m визначають після її розрахунку для цього періоду водоспоживання як алгебраїчну суму втрат напору в ділянках мережі від місця підключення водоводу до диктуючої точки.

Максимальний тиск P_{\max} , за якого вимикається насос, визначається за формулою (12) при відомих значеннях P_{\min} і ε .

Для швидкого окислення розчиненого у воді двовуглекисло-го заліза $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ з переходом його до малорозчинного колоїдного гідроксиду заліза $\text{Fe}(\text{OH})_3$ відповідно до хімічної реакції



у водоповітряному баку 4 (див. рисунок) змонтовано біореактор 30 з волокнистим завантаженням, на волокнах якого іммобілізовані специфічні залізобактерії *Gallionella ferruginea* швидко окислюють Fe^{2+} у Fe^{3+} , використовуючи звільнену енергію для своєї життєдіяльності.

Вперше німецькі та французькі спеціалісти [6, 7] показали переваги застосування біологічного методу знезалізнення води порівняно з фізико-хімічним. У цих роботах було показано, що повне видалення з води заліза і марганцю відбувається при швидкостях фільтрування води до 100 м/год.

Але для біологічного знезалізнення підземних вод слід виконувати такі умови:

- насичення вихідної води киснем здійснювати у точній відповідності зі стехіометричною кількістю, необхідною для окислення двовалентного заліза

$$[\text{O}_2] = 0,143 [\text{Fe}^{2+}], \text{ мг/дм}^3, \quad (16)$$

де Fe^{2+} — вміст двовалентного заліза у вихідній воді мг/дм³;

- створити сприятливе середовище для закріплення у фільтрувальному завантаженні залізобактерій.

Діаметр водоповітряного баку визначають за формулою:

$$D_6 = 1,13 \sqrt{\frac{Q_p}{V_6}}, \text{ м}, \quad (17)$$

де V_6 — швидкість руху води в баку через біореактор, яку можна приймати до 50 м/год.

Прийнявши діаметр еластичного мішка $d_m = 0,8 D_6$, м, (18)

визначають його висоту при тиску P_{\min} :

$$h_m = \frac{4W_m}{\pi d_m^2}, \text{ м}. \quad (19)$$

Висоту біореактора слід приймати не менше 0,5 м.

Для напірного освітлювального фільтра 9 необхідно визначити оптимальні конструктивні й технологічні параметри для забезпечення надійності роботи і потрібної якості очищеної води при мінімальній її собівартості.

Тривалість фільтроциклу визначається за формулою [8]:

$$T_{\text{ф. max}} = \frac{1089}{V_{\text{ф. ср}} \sqrt{C_{\text{в}}}}, \text{ год.} \quad (20)$$

де $V_{\text{ф. ср}}$ – середня швидкість фільтрування води протягом доби, м/год; $C_{\text{в}}$ – вміст заліза у вихідній воді, мг/дм³.

Потрібний діаметр напірного фільтра розраховують із формули

$$D_{\text{ф}} = 1,13 \sqrt{\frac{Q_{\text{ср. год}}}{V_{\text{ф. ср}}}}, \text{ м.} \quad (21)$$

де $Q_{\text{ср. год}}$ – середня витрата води через фільтр, м³/год, при швидкості $V_{\text{ф. ср}}$.

Як бачимо з формул (20) і (21), із збільшенням швидкості фільтрування води $V_{\text{ф. ср}}$ зменшується діаметр фільтра, а отже, і його вартість, але зменшується і тривалість фільтроциклу, що призводить до збільшення числа його промивань, тобто зростання експлуатаційних витрат.

Дослідження показали [8], що за біологічного методу значно більші максимальна питома брудомісткість фільтра і максимальна тривалість фільтроциклу, ніж за фізико-хімічного методу. Це пояснюється тим, що в затриманні заліза на пінополістирольному фільтрі беруть участь не тільки сили адгезії у фільтрувальному завантаженні, але й сили гравітації у підфільтровому просторі, де пластівці з гідроксиду заліза $\text{Fe}(\text{OH})_3$ укрупнюються і випадають в осад як у прояснювачі із завислим осадом.

Гранули пінополістирольного завантаження є тільки скелетом фільтра, в порах якого накопичується осад із гідроксидів заліза, що власне і є водоочисним середовищем: дрібні пластівці з гідроксиду заліза у нових порціях води, що надходять на фільтр, швидко крупнішають, затримуючись у нижньо-

му шарі пінополістирольного фільтра, а потім у стисненому шарі пластівців і зрештою, випадають у осад у підфільтровому просторі. Тому при промиванні фільтра у ньому необхідно залишати певний об'єм осаду з гідроксиду заліза $\text{Fe}(\text{OH})_3$ для забезпечення величини мінімальної питомої брудомісткості фільтра $G_{6,\text{min}}$, що визначається за формулою:

$$G_{6,\text{min}} = \left(1,71 - \frac{5,17}{C_b} \right)^{7,14}, \text{ кг/м}^2. \quad (22)$$

Попередню «зарядку» фільтра осадом з гідроксиду заліза необхідно виконувати, якщо вміст заліза у вихідній воді $C_b > 3,03 \text{ мг/дм}^3$.

Висота фільтрувального завантаження від нижньої поверхні до верхньої дренажної системи дорівнює $H_\phi = 1 \text{ м}$, а висота підфільтрового простору $H_{\text{н.ф}} = 0,6 \text{ м}$. Загальна висота напірного фільтра становить $H_n = 2 \text{ м}$. Втрати напору на фільтрі контролюють дифманометром 32. Пусконаладжувальними роботами визначають максимальну тривалість фільтроциклу $T_{\text{ф.макс}}$, при якій досягається максимально допустимий вміст заліза у фільтрованій воді $C_\phi = 0,3 \text{ мг/дм}^3$ і відповідні йому максимальні втрати напору $h_{\text{ф.макс}}$. У подальшій роботі установки кінець фільтроциклу, тобто необхідність промивання фільтра, визначають за величиною $h_{\text{ф.макс}}$.

Промивають фільтр у години мінімального водоспоживання з інтенсивністю, що визначається з формули

$$q_{\text{пр}} = 0,35 \frac{Q_n}{D_\phi^2}, \text{ дм}^3/\text{с} \cdot \text{м}^2, \quad (23)$$

в якій подача насоса Q_n , $\text{м}^3/\text{год}$, приймається за формулою (9).

Тривалість промивання фільтра $t_{\text{пр}}$ визначають розрахунками залежно від величин C_b і $q_{\text{пр}}$, виходячи з вимог забезпечення мінімальної залишкової питомої брудомісткості фільтра $G_{6,\text{min}}$.

Після промивання фільтра перший фільтрат скидають по трубі 14 при відкритій засувці 21 і закритій 20. Тривалість скидання першого фільтрату обліковують за формулою

$$t_{\text{н.ф}} = \frac{60 H_\phi}{V_{\text{ф.мін}}}, \text{ хв}, \quad (24)$$

де $V_{\text{ф.мін}}$ — швидкість фільтрування води в період мінімального водоспоживання, м/год.

Після цього закривають засувку 21, відкривають 20 і очищену воду подають споживачам по трубопроводу 15.

Гази, що виділяються з води у водоповітряному баку 4 й напірному фільтрі 9, випускаються через вантузи 5.

Висновок. Запропоновано вдосконалену конструкцію напірної установки для знезалізнення підземних вод і наведено методику її розрахунку для забезпечення оптимальних конструктивних і технологічних параметрів, підвищення ефективності роботи та надійності експлуатації.

1. Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Хоружий В.П. Ресурсозберігаючі технології водопостачання. — К.: Аграр. наука, 2008. — 534 с.

2. Деклараційний патент на винахід 43566. Напірна установка для знезалізнення води / П.Д. Хоружий, Т.П. Хомуцька, С.В. Стасюк, Д.В. Чарний. — Опубл. 17.12.2001 р.

3. Деклараційний патент на корисну модель. Напірна установка для знезалізнення води / П.Д. Хоружий, Т.П. Хомуцька, В.П. Хоружий. — Опубл. 15.09.2005 р.

4. Хоружий П.Д., Стасюк С.В., Хоружий В.П. Розрахунок ежекторів для напірних водоочисних установок // Коммунальное хозяйство городов: наук. техн. зб. Вып. 29. — К.: Техніка, 2001. — С. 13–14.

5. Хоружий В.П. Розрахунок напірних водознезалізнювальних установок // Меліорація і водне господарство. — К.: Аграр. наука. — 2004. — Вип. 91. — С. 274–281.

6. Grochmann A., Gollasch R., Chumacher G. Biologische enteisenung und entmanganung eines methanhaltigen grundwasser in speyer// GWF. Wasser, Abwasser. — 1989. — 9. — S. 441–447.

7. Badjo I., Mouches P. Technologies appropriées // L'exemple d'une grande installation de deferrisation biologique au Togo. — 2010. — V. 38, № 3. — P. 197–206.

8. Хоружий П.Д., Хомуцькая Т.П., Хоружий В.П. Исследование процессов и разработка технологии обезжелезивания подземных вод с помощью железобактерий // Химия и технология воды. — 2003. — Т. 25, № 5. — С. 465–475.

Предложена новая конструкция напорной установки для обезжелезивания подземных вод и методика ее расчета.

The new design of pressure head installation for iron removal of groundwater and its method of calculation is offered.