

О.В. РУБАН, аспірантка
Інститут водних проблем і меліорації НААН

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАТРИМАННЯ ЗАЛІЗА ПРИ ФІЛЬТРУВАННІ ВОДИ

Наведено результати експериментальних та теоретичних досліджень процесів затримання нерозчинних сполук заліза при фільтруванні води на піщаних і пінополістирольних фільтрах.

Ключові слова: знезалізнення води; конструктивні і технологічні параметри фільтра; низхідне і висхідне фільтрування води; питома брудомісткість фільтра.

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов задержания нерастворимых соединений железа при фильтровании воды на песчаных и пенополистирольных фильтрах.

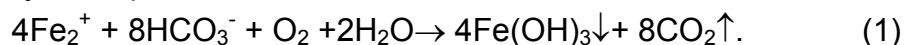
Ключевые слова: обезжелезивание воды; конструктивные и технологические параметры фильтра; нисходящее и восходящее фильтрование воды; удельная грязеемкость фильтра.

The paper presents results of experimental and theoretical studies the processes of detention insoluble iron compounds by filtering water on sand and polystyrene filters.

Key words: iron removal of water; constructive and technological parameters of the filter; the descending and ascending filtration of water; a specific contaminant capacity of filter.

При виборі методу знезалізнення підземних вод необхідно знати їх фізико-хімічні властивості з точки зору забезпечення нерозчинності заліза, яке потрібно видалити з води. Для цього потрібно враховувати відмінності між мінеральною і органічною формами походження сполук заліза, оскільки для мінеральних сполук схема знезалізнення води значно простіша, а для органічних – більш складна і трудомістка, що вимагає значно більших витрат на будівництво і експлуатацію знезалізнювальних установок.

У підземних водах залізо найчастіше зустрічається в розчиненому стані у вигляді бікарбонату двовуглекислого заліза $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$, процес окислення та гідролізу якого описується рівнянням:



Швидкість такого окислення збільшується при підвищенні значення рН води та збільшенні концентрації в ній розчиненого кисню.

Як відомо, фільтрування води – це процес відділення з неї як з двофазної системи твердої фази (суспензії) при її русі через фільтруюче завантаження.

У вихідній воді перед фільтруванням тверда фаза повинна бути сформована у вигляді пластівців з гідроксидів заліза $\text{Fe}(\text{OH})_3$, густина яких значною мірою залежить від методу обробки води.

Фільтрування є обов'язковою технологічною операцією в процесі знезалізнення води. При фільтруванні води через фільтри із завантаженням, важчим за воду, вона рухається зверху вниз. При затриманні заліза на поверхні зерен фільтрувального завантаження утворюється каталітична плівка з іонів і оксидів дво- і тривалентного заліза, яка активно інтенсифікує процеси окислення та видалення заліза з води.

Знезалізнення води у фільтрувальному завантаженні, поверхня зерен якого покрита плівкою, є гетерогенним автокаталітичним процесом, в результаті якого забезпечується безперервне відновлення плівки як каталізатора безпосередньо під час роботи фільтра.

У цьому випадку спрощена аерація здійснюється за допомогою розбрикування води в повітрі або вдуванням повітря у вихідну воду допоміжним насосом, що спрощує експлуатацію установки та зменшує собівартість очищення води. Численні експерименти процесів знезалізнення води на фільтрах, виконані багатьма авторами [1, 2, 5, 8, 9, 10], показали, що якість фільтрованої води $C_{\text{ф}}$ залежить від низки факторів:

$$C_{\text{ф}} = f(C_0; \text{pH}; E_{\text{h}}; t^{\circ}; d_e; H_{\text{ф}}; K_{\text{н}}; V_{\text{ф}}; T_{\text{ф}}), \quad (2)$$

де C_0 – вміст заліза у вихідній воді, мг/дм^3 ; t° – температура води, $^{\circ}\text{C}$; d_e – еквівалентний діаметр зерен фільтрувального завантаження, мм ; $H_{\text{ф}}$ – товщина шару завантаження, м ; $K_{\text{н}}$ – коефіцієнт неоднорідності зерен завантаження; $V_{\text{ф}}$ – швидкість фільтрування води, м/год ; $T_{\text{ф}}$ – тривалість фільтрування води, год .

При фільтруванні води на колонці (рис. 1) якість фільтрованої води змінюється у просторі (при різній товщині шару фільтрувального завантаження) та в часі (тривалість контакту проаерованої, залізовміщуючої води з гранулами фільтрувального завантаження). Проведені дослідження показали, що із збільшенням товщини завантаження $H_{\text{ф}}$ та часу роботи фільтра вміст заліза у фільтрованій воді $C_{\text{ф}}$ зменшується.

Дослідження велись при фільтруванні води з показниками: $C_0 = 10 \text{ мг/дм}^3$; $\text{pH} = 6,9$; $t = 15^{\circ}\text{C}$; $V_{\text{ф}} = 10 \text{ м/год}$.

Вода для аналізів відбиралась пробовідбірниками 6 для різної товщини фільтрувального завантаження, загальна висота якого становила $H_{\text{ф}} = 1,5 \text{ м}$. Такі проби відбирались на початку фільтроцикла і через 5 годин роботи фільтра ($T_{\text{ф}} = 5 \text{ год}$).

Графіки залежності $C_{\text{ф},ij} = f(H_{\text{ф},i}; T_{\text{ф},j})$, побудовані за результатами експериментальних досліджень, у класичних координатах показано на рис. 2, а в напівлогарифмічних координатах – на рис.3.

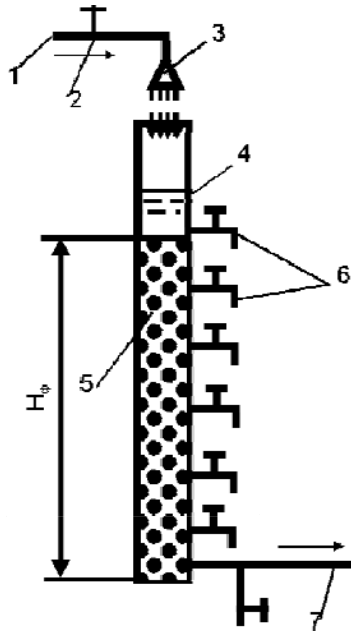


Рис.1. Експериментальна фільтрувальна колонка для контролю якості води по висоті фільтрувального завантаження:

- 1 – подача води; 2 – регулюючий вентиль; 3 – аератор; 4 – фільтрувальна колонка; 5 – завантаження з кварцевого піску $d_e = 1,23$ мм; $K_n = 1,3$; 6 – пробовідбірники; 7 – відведення фільтрованої води

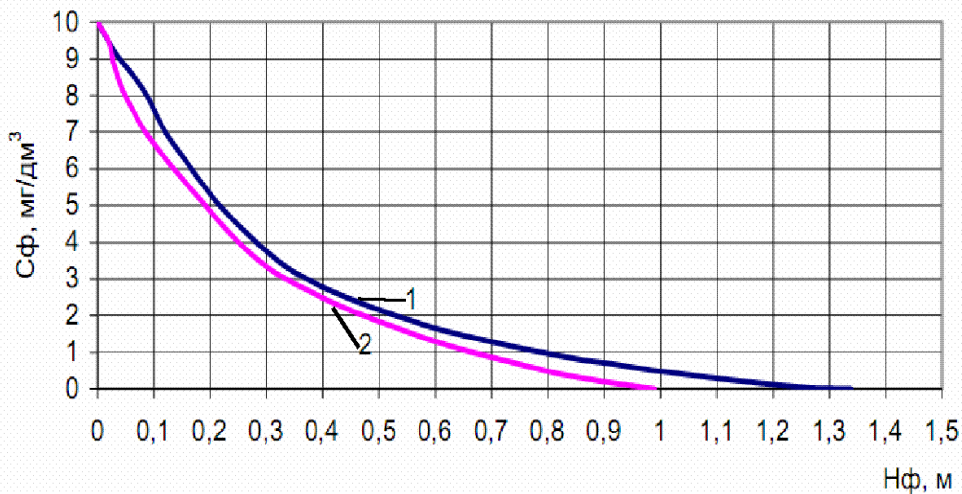


Рис. 2. Графіки залежності $C_{\phi,i} = f(H_{\phi,i})$:

- 1 – на початку фільтроцикла; 2 – через 5 годин роботи фільтра ($T_{\phi} = 5$ год)

Численні експерименти свідчать про те [1], що графічне зображення в напівлогарифмічних координатах затримання заліза по висоті фільтрувального шару $lg C_{\phi,i} = f(H_{\phi,i})$, як правило, має форму прямої лінії (рис.3).

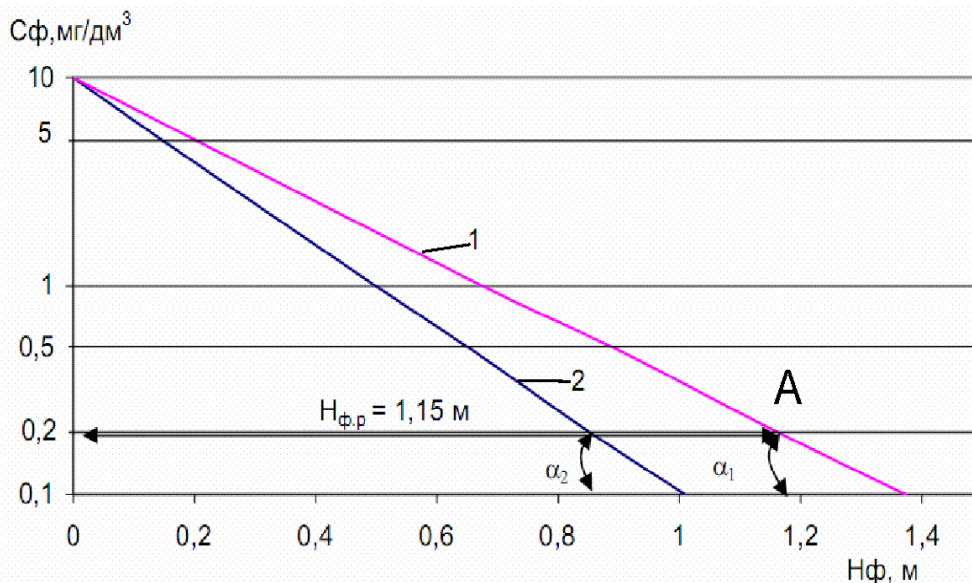


Рис. 3. Графіки залежності $C_{ф,i} = f(H_{ф,i})$ в напівлогарифмічних координатах:
 1 – на початку фільтроцикла; 2 – через 5 годин роботи фільтра

З рис. 3 бачимо, що відношення

$$\lg\left(\frac{C_{ф,о} - C_n}{C_0}\right) = H_{ф,р} \cdot m \cdot \operatorname{tg}\alpha = H_{ф,р} \cdot P, \quad (3)$$

де $C_{ф,о}$ і C_n – вміст заліза, мг/дм³, відповідно у вихідній та очищеній воді; $H_{ф,р}$ – висота фільтрувального завантаження, м, при якій для заданих умов знезалізнення води досягається нормативна якість знезалізненої води C_n ; α – кут нахилу до осі абсцис прямої лінії на рис. 3; P, m – параметри затримання заліза у даному фільтрувальному завантаженні, які залежать від показників якості вихідної води (pH, E_h, t°), конструктивних параметрів фільтра (d_e, K_n) і технологічних параметрів фільтрування води ($V_{ф}, T_{ф}$).

При фільтруванні води зерна завантаження покриваються плівкою з гідроксидів заліза, які мають каталітичні властивості і прискорюють процес переходу двовалентного заліза Fe^{2+} у тривалентну форму Fe^{3+} із затриманням його в порах фільтрувального завантаження. Тому в процесі фільтроцикла кут α , а отже і параметр P збільшується. На початку фільтроцикла цей кут дорівнював α_1 , а через 5 год фільтрування – α_2 (рис.3).

Отже, розрахункова висота фільтрувального завантаження із заданими конструктивними параметрами для забезпечення нормативного вмісту заліза у питній воді ($C_n = 0,2$ мг/дм³) на початку фільтроцикла, м, визначається за формулою (3). Параметр P в цій формулі слід визначати методом пробного знезалізнення води при відомих параметрах її якості та фільтрувального завантаження і прийнявши відповідну швидкість фільтрування води $V_{ф}$.

Для розглянутого прикладу ця величина дорівнює абсцисі точки А на лінії 1 (рис. 3), ордината якої дорівнює $\lg 0,2$, тобто $H_{ф,р} = 1,15$ м. При цьому параметр P за формулою (3) становить $P = 0,99/1,15 = 0,86$.

Висхідне фільтрування води через фільтри з плаваючим завантаженням має свої особливості, які полягають у тому, що дрібніші гранули пінополістиролу розташовуються завжди внизу фільтрувального завантаження, у якого водопрохідні канали швидко заповнюються осадами, в той час як верхні шари майже не використовуються.

У підфільтровому просторі контактено-прояснювального фільтра (КПФ) (рис.4) шар осаду з пластівців є полідисперсним середовищем, оскільки величина пластівців постійно змінюється, руйнуючись під впливом гідродинамічної дії висхідного потоку води.

Дрібні часточки пластівців 8 проникають в нижній шар плаваючого завантаження, створюючи шар намивного фільтра з виділених осадів 7, притиснутого гідродинамічним потоком до нижньої поверхні фільтрувального завантаження 2. Отже, в підфільтровому просторі КПФ будуть одночасно знаходитись пластівці, які випадають в осад на дно фільтра, дрібні пластівці, що утворюють шар намивного фільтра 7, і окремі пластівці 8, що знаходяться у завислому стані. Все це залежить від розмірів пластівців, їх густини і швидкості висхідного руху води $V_{\text{ф}}$.

При фільтруванні води через КПФ відбувається безперервна зміна геометричної структури підфільтрового простору внаслідок накопичення в ньому частинок суспензії, які виділяються з води. Це значно ускладнює процес прояснення води і можливість його математичного моделювання.

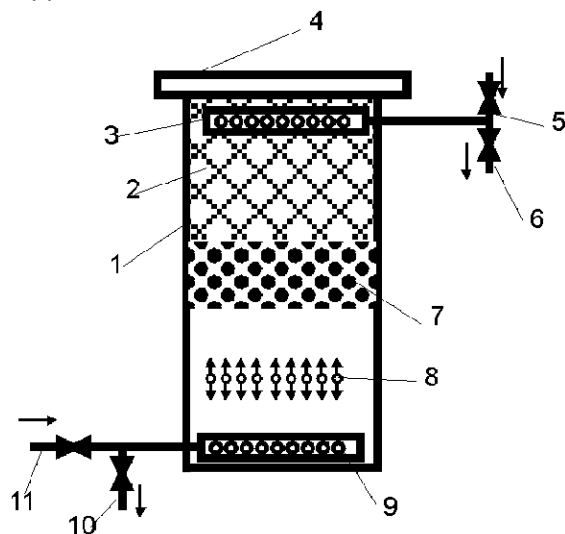


Рис. 4. Схема роботи контактено-прояснювального фільтра:

- 1 – корпус фільтра; 2 – плаваюче фільтрувальне завантаження;
- 3 – ковшковий дренаж; 4 – кришка; 5 – подача води на промивку;
- 6 – відведення фільтрованої води; 7 – стиснутий шар пластівців;
- 8 – пластівець; 9 – нижній дренаж; 10 – скидання промивної води;
- 11 – подача вихідної води на КПФ

На відміну від прояснювача із завислим осадами, в якому надлишки осаду скидаються в осадоушільнювач, а в зоні прояснення концентрація завислих речовин залишається практично постійною, в підфільтровому

просторі КПФ протягом фільтроциклу відбувається безперервне накопичення осаду та збільшення його концентрації, що призводить до явища стисненого осідання пластівців, характерна особливість якого полягає в тому, що швидкість осідання залежить не тільки від розмірів і ваги пластівців, але й від їх концентрації.

Швидкість стисненого осідання частинок завжди менша від швидкості їх вільного падіння, тобто їх гідравлічної крупності. При об'ємній концентрації 10% швидкість осідання пластівців зменшується у два рази, а при концентрації 25% – у 6 разів [7].

Існування завислого шару та явищ стисненого осідання пластівців визначається співвідношенням сили гідродинамічної дії потоку на ці частинки, їх вагою та концентрацією. Явище завислого шару виникає тоді, коли сили тиску на цей шар дорівнюють його вазі у воді.

Перепад тиску у шарі завислого осаду товщиною L визначається за формулою:

$$P = (\rho_n - \rho_v) g (1 - m) L, \quad (4)$$

де ρ_n і ρ_v – густина, відповідно, пластівців і води; g – прискорення сили тяжіння; m – поруватість завислого осаду.

Швидкість осідання пластівців у підфільтровому просторі КПФ визначається за формулою Стокса:

$$\Theta = \sqrt{\frac{\pi}{6}} \frac{\rho_n - \rho_v}{\rho_v} g \frac{d_e}{\psi}, \quad (5)$$

де d_e – еквівалентний діаметр пластівця; ψ – коефіцієнт гідравлічного опору, який залежить від числа Рейнольдса і для лінійного закону опору визначається за формулою

$$\psi = A / R_e, \quad (6)$$

A – константа, що залежить від умов осідання пластівців; R_e – число Рейнольдса:

$$R_e = \rho_v \Theta d_e / \mu, \quad (7)$$

де μ – в'язкість води.

Якщо швидкість висхідного потоку V_ϕ перевищує величину Θ , визначену за формулою (5), то пластівці піднімаються вгору до нижнього шару плаваючого завантаження, проникають в його пори або притискуються до нього. Якщо $V_\phi < \Theta$, то пластівці осідають на дно фільтра, а якщо $V_\phi = \Theta$, то вони знаходяться у завислому стані.

Оскільки концентрація осаду в підфільтровому просторі безперервно зростає, то коефіцієнт гідравлічного опору ψ також збільшується, а значить швидкість стисненого осідання Θ зменшується для пластівців однакового діаметра d_e .

Оскільки у формулі (5) знаходяться дві невідомі величини Θ і ψ , то рівняння (5) є невизначеним. Для його вирішення Д.М.Мінц [7] рекомендує проводити 2-3 експериментальних досліджень на діючих спорудах. Це можна

робити на практиці для прояснювачів із завислим осадом, в яких концентрація осаду приблизно стабільна, але зовсім недоцільно для КПФ з постійним зростанням цієї концентрації.

Для виконання інженерних розрахунків КПФ доцільно визначати питому брудомісткість фільтрувального завантаження G_n , від величини якої залежить і якість фільтрованої води C_{ϕ} , і втрати напору на фільтрі h_{ϕ} [5,8,9].

На основі експериментальних досліджень для КПФ з відповідними конструктивними параметрами необхідно визначати закономірності зміни ефективності знезалізнення води E і коефіцієнта фільтрації K_{ϕ} від величини питомої брудомісткості фільтра G_n , кг/м², яка в будь-який конкретний момент часу протягом фільтроциклу визначається за формулою [5]

$$G_{nk} = 0,00191 V_{\phi} T_{\phi,k} (C_0 - C_{\phi,k}), \quad (8)$$

де 0,00191 – перевідний коефіцієнт, що враховує співвідношення молекулярної маси гідроксиду заліза (107) до атомної маси двовалентного заліза (56), і зменшений у 1000 разів; V_{ϕ} – швидкість фільтрування води, м/год; $T_{\phi,k}$ – тривалість фільтрування води від початку роботи фільтра і до даного моменту, год; C_0 і $C_{\phi,k}$ – вміст заліза відповідно у вихідній і фільтрованій воді (для питної води $C_{\phi,k} \leq 0,2$ мг/дм³).

Знаючи залежності $E = f(G_n)$ та $K_{\phi} = f(G_n)$, легко визначити вміст заліза у фільтрованій воді $C_{\phi,i}$, мг/дм³, і втрати напору h_{ϕ} на фільтрі, м, а отже і розрахункову тривалість фільтроциклу $T_{\phi,p}$.

Висновки

1. У підземних водах залізо найчастіше зустрічається в розчиненому стані у вигляді бікарбонату двовалентного заліза $Fe(HCO_3)_2$, процес окислення та гідролізу якого описується рівнянням (1), а якість фільтрованої води залежить згідно виразу (2) від фізико-хімічних властивостей вихідної води та конструктивних і технологічних параметрів фільтра.

2. Розрахункову висоту важкого фільтрувального завантаження у фільтрах із низхідним рухом води для забезпечення нормативного вмісту заліза у питній воді на початку фільтроцикла слід визначати за формулою (3), в якій параметр P визначають методом пробного знезалізнення води для відповідних параметрів роботи водознезалізнювальної установки.

3. Для виконання інженерних розрахунків фільтрів з плаваючим завантаженням та висхідним рухом води слід визначати питому брудомісткість фільтрувального завантаження G_n за формулою (8), від якої залежить ефективність знезалізнення води E і коефіцієнт фільтрації завантаження K_{ϕ} , що визначає втрати напору на фільтрі.

Список літератури

1. *Николадзе Г.И.* Улучшение качества подземных вод – М.: Стройиздат, 1987. – 240 с.
2. *Клячко В.А., Апельцин И.Э.* Очистка природных вод. – М.: Стройиздат, 1987. – 579 с.
3. *ДСанПіН 2.2.-4-171-10* Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. Затверджено наказом МОЗУ 12.05.2010 №400. Зареєстровано в МЮУ 1.07.2010 № 452/17747.
4. *Grochmann A., Gollasch R., Chumacher G.* Biologische enteisenung und entmanganung eines methanhaltigen grundwasser in spegir / GWF. Wasser, Abwasser, 1989. – 9. – S.441– 447.
5. *Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П.* Исследование процессов и разработка технологии обезжелезивания воды с помощью железобактерий // Химия и технология воды, 2003. – Т.25, №5. – С. 465 – 475.
6. *Тугай А.М., Орлов В.О.* Водопостачання: Підручник. – К.: Знання, 2009. – 735 с.
7. *Миц Д.М.* Теоретические основы технологии очистки воды. – М.: Стройиздат, 1964. – 156 с.
8. *Хомутецька Т.П.* Розрахунок параметрів знезалізнення води при висхідному фільтруванні через пінополістирольно-цеолітові фільтри// Коммунальное хозяйство городов: н-техн. сб. Вып.19. – К.: Техніка, 1999 – С. 141–143.
9. *Хоружий В.П.* Розрахунок напірних водознезалізнювальних установок//Меліорація і водне господарство, вип.91. – К.: Аграрна наука. – 2004. – С. 274–281.
10. *Орлов В.О., Квартенко О.М., Мартинов С.Ю., Гордієнко Ю.І.* Знезалізнення підземних вод для питних цілей. – Рівне: УДУВГП, 2004. – 155 с.
11. *Киселев С.К.* Изменение фильтрационных свойств загрузки фильтра при обезжелезивании воды.// Меліорація і водне господарство. – К.: Аграрна наука. – 1997 – вип. 84. – С.190–184.
12. *Олійник О.Я., Кисельов С.К.* Теоретичні дослідження втрат напору на очисних фільтрах при знезалізненні води// Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – Вип.1 – К.: КНУБА, 2003. – С.3–12.