

УДК 628.515

Я.А.ТУГАЙ, канд. техн. наук, О.О.САДЧИКОВ  
*Київський національний університет будівництва і архітектури*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ НА ДВОШАРОВИХ ФІЛЬТРАХ**

Проведено теоретичне обґрунтування і запропоновані аналітичні залежності для розрахунку очисних фільтрів з двошаровим завантаженням при знезалізненні. Представлено математичні моделі процесів і пропозиції щодо їх уточнення при фільтруванні на двошарових фільтрах.

Проведено теоретическое обоснование и предложены аналитические зависимости для расчета очистных фильтров с двухслойной загрузкой при обезжелезивании. Представлены математические модели процессов и предложения по их уточнению при фильтровании на двухслойных фильтрах.

Theoretical justification and proposals on analytical dependences for calculation of the two-bed polisher during deferrization of water are provided. Presentation of simulator for processes and proposals for specifications for filtering with two-bed polisher.

*Ключові слова:* знезалізнення, гідроксид заліза, двошаровий фільтр, інтегральне перетворення Лапласа.

Води багатьох підземних водоносних горизонтів України мають підвищений вміст заліза, який коливається від 0,5 до 30 мг/л і більше. Підвищена концентрація заліза у воді викликає відкладення у котлах, теплообмінниках, трубопроводах, арматурі, а також погіршує органолептичні показники води та здоров'я людини.

Існуючі технології очистки води від заліза, в загальному вигляді, можна характеризувати з точки зору класифікації домішок, що знаходяться у воді, по фазово-дисперсному стану.

Залізо, що знаходиться у воді, згідно з цією класифікацією, відноситься до домішок II і IV груп. Видалення розчинених у воді домішок IV групи (іонні розчини з лінійними розмірами  $10^{-7} \dots 10^{-8}$  см) відбувається шляхом переведу їх в гетерогенну систему, в яку входять малорозчинні сполуки розмірами  $10^{-5} \dots 10^{-6}$  см (домішки II групи), за допомогою окислення.

Наступне відділення домішок II групи від води може здійснюватися за допомогою сил гравітації у відстійниках та освітлювачах або сил адгезії – у фільтрах.

Найбільш розповсюдженим методом знезалізнення води є фільтрування через зернисте завантаження з природних чи штучних матеріалів в спеціальних технологічних установках, основними конструктивними елементами яких є фільтр.

При знезалізненні води фільтруванням відбуваються хімічні реакції в фільтруючій воді, фізико-хімічні процеси взаємодії на границях

двох фаз, фазові перетворення основних компонентів і, як наслідок цього, масообмінні процеси між водою, що очищається, та матеріалом завантаження.

На початку фільтроциклу зростання втрат напору в усіх шарах фільтрувального завантаження відбувається рівномірно. Внаслідок каталітичного впливу осаду із гідроксиду заліза по мірі його накопичення швидкість окислення двохвалентного заліза  $Fe^{2+}$  збільшується. Більша частина осаду починає затримуватись у верхній частині фільтру, що не дає змоги працювати нижній, а тому до кінця фільтроциклу рівномірність розподілу втрат напору по висоті фільтрувального завантаження порушується. Тому було запропоновано метод видалення з води заліза на двошаровому фільтрі з різними матеріалами та коефіцієнтами неоднорідності завантажень.

При освітленні води від малокоцентрованих полідисперсних суспензій і інших завислих речовин різного механічного складу, фільтрування через шари завантаження фільтра із різних матеріалів може відбуватись при можливих двох технологічних схемах роботи очисних фільтрів. Так, за рахунок різних механізмів і процесів у першій схемі спочатку відбувається внутрішня механічна кольматація завантаження завислими частинками забруднення всередині фільтра. Через деякий час (друга схема) відбувається формування зовнішнього шару осаду, що утворюється на поверхні фільтра із більших частинок забруднення, які не можуть проникнути всередину фільтра. При цьому відбувається одночасна кольматація всередині фільтра дрібнішими частинками і відкладення шару осаду з частинок більшого розміру на зовнішній верхній границі фільтра. Процес закінчується, коли насичення на зовнішній границі буде таким, що і дрібні частинки не зможуть потрапити всередину фільтра, тобто всі завислі речовини будуть осаджуватись на рухомій границі осаду, то для продовження технологічного процесу освітлення суспензії і роботи фільтра необхідна його промивка. Внаслідок накопичення осаду в завантаженні і утворення зовнішнього осаду зменшується коефіцієнт фільтрації окремих шарів і збільшується гідравлічний опір фільтра, що призводить до збільшення втрат напору і в загальному випадку до зменшення швидкості фільтрації [1-3].

У загальному випадку основою для визначення втрат напору може бути гідродинамічна модель фільтрації, яка складається з двох рівнянь – рівняння фільтрації і рівняння нерозривності фільтраційного потоку, складених з врахуванням зміни властивостей середовища.

Як відомо, в умовах жорсткого режиму  $\left( \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \right)$  напірної філь-

трації, коли поперечний переріз фільтра по висоті не змінюється ( $S = const$ ) і коефіцієнт фільтрації  $k(x, y, z) = k_0 = const$  в границях кожного горизонтального шару чистого фільтра, однорічне рівняння фільтрації в кожному однорідному шарі завантаження буде:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = -\frac{1}{k_0} \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

де  $h(x)$  – напір в однорідному завантаженні.

Рішення рівняння (1) у випадку однорідного фільтра при  $x = 0$ ,  $h = h_0$  і  $x = L$ ,  $h = 0$  буде:

$$h(x) = h_0 - \frac{h_0}{L} x. \quad (2)$$

Оскільки (згідно із законом Дарсі)  $V = -k_0 \frac{\partial h}{\partial x}$ , тоді маємо

$$V = k_0 \frac{h_0}{L} = k_0 i_0. \quad (3)$$

Таким чином, градієнт напору  $i_0$  та швидкість фільтрування  $V$  у випадку чистого фільтру будуть однаковими у всіх точках області фільтрації.

У випадку двошарового фільтру з параметрами верхнього шару  $L_1, k_{0_1}$  і нижнього шару  $L_2, k_{0_2}$  в результаті рішення рівняння (1) з граничними умовами: при  $x = 0$ ,  $h = h_0$ ; при  $x = L_1$ ,  $h_1 = h_2$ ,  $k_{0_1} \frac{\partial h_1}{\partial x} = k_{0_2} \frac{\partial h_2}{\partial x}$ ; при  $x = L$ ,  $h = 0$ . Таким чином, при  $L_1 = L_2$  маємо:

$$h_1(x) = h_0 \left( 1 - \frac{2k_{0_2}}{k_{0_1} + k_{0_2}} \frac{x}{L} \right);$$

$$h_2(x) = 2h_0 \frac{k_{0_1}}{k_{0_1} + k_{0_2}} \left( 1 - \frac{x}{L} \right);$$

$$V_1 = -k_{0_1} \frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{2k_{0_1} k_{0_2}}{k_{0_1} + k_{0_2}} \frac{h_0}{L};$$

$$V_2 = -k_{0_2} \frac{\partial h_2}{\partial x} = \frac{2k_{0_1} k_{0_2}}{k_{0_1} + k_{0_2}} \frac{h_0}{L} = V_1,$$

де  $h_1(x)$  і  $h_2(x)$  – напори в шарах двошарового завантаження [4].

Розглядається наближена модель фільтрації з урахуванням кольматації завантаження фільтра і утворенням осаду на його поверхні і приймаючи при цьому значення коефіцієнтів фільтрації в зазначених зонах для кожного фільтроцикла роботи фільтра. При визначенні розрахункових осереднених коефіцієнтів фільтрації зовнішнього шару зовнішнього осаду і закольматованого фільтра повинні бути враховані зазначені технологічні схеми роботи фільтра. Модель фільтрації передбачає розгляд двох можливих технологічних схем (випадків) фільтрування, а саме при сталому вихідному напорі на фільтрі (постійному перепаді напору) і при додержанні сталої (незмінної) швидкості фільтрування, яка дорівнює початковій для чистого фільтра. В першому випадку за часом зменшується витрата рідини (швидкість фільтрування), яка проходить через фільтр  $Q(t)$ . В другому випадку (технологічній схемі), який в основному використовується при роботі очисних фільтрів, за часом за рахунок збільшення гідравлічного опору у фільтрі для додержання  $V=const$  буде зростати робочий напір на фільтрі  $H_0(t)$ . Як відомо, в зазначених випадках режим фільтрування буде лінійним, який відповідає відомому закону Дарсі, і поперечний переріз фільтра по висоті не змінюється ( $F = const$ ), тоді в умовах жорсткого режиму напірної фільтрації (рідина і пористе середовище нестисливі) одномірне рівняння фільтрації має вигляд (початок координат  $x = 0$  приймається на виході з фільтра і вісь ординат  $x$  направлена вгору) [5]:

$$\frac{\partial^2 h_i}{\partial x^2} = -\frac{1}{k_i} \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

де  $i = 1$  при  $L < x < L + l_i$ ,  $i = 2$ , при  $0 > x > L$ ,  $Q$  – витрата фільтруючої рідини;  $V$  – швидкість фільтрації;  $k_{1,2}$  – відповідно усереднені коефіцієнти фільтрації першого та другого шарів завантаження фільтра;  $h_{1,2}$  – напір фільтраційного потоку відповідно в шарах завантаження фільтру.

Рівняння розв'язується при наступних умовах:

- 1) при  $x = L + l$

$$\Delta \frac{\partial l}{\partial t} = C_1 k_1 \frac{\partial h_1(L+l, t)}{\partial x}, \quad h_1(L+l, t) = H_1 + L = const ;$$

$$2) \text{ при } x = L \quad h_1(L, t) = h_2(L, t), \quad k_1 \frac{\partial h_1(L, t)}{\partial x} = k_2 \frac{\partial h_2(L, t)}{\partial x} ;$$

3) при  $x = 0 \quad h_2(0, t) = H_b = const$ . Тут  $H_1$  – висота стовпа рідини над верхом фільтра,  $C_1$  – об’ємна середня концентрація завислих частинок в рідині, яка утворює відкладення зовнішнього осаду  $\Delta_1 = 1 - n_1$ ,  $n_1$  – осереднена пористість зовнішнього осаду.

Зазначимо, що в першому випадку при роботі фільтра з постійним напором  $H_0 = H_1 + L - H_b = const$  і при швидкості фільтрування  $V(t)$ , яка за часом зменшується, на рухомій границі осаду  $z = L + l(t)$ , тобто:

$$V = \frac{Q}{F} = k_1 \frac{\partial h(L+l, t)}{\partial x}. \quad (5)$$

В результаті рішення задачі одержимо для визначення напорів:

$$h_1(x) = \frac{H_1 + L - H_b}{\partial L + l} x + H_b, \quad h_2(x) = \sigma \frac{H_1 + L - H_b}{\partial L + l} x + H_b. \quad (6)$$

Для визначення рухомої границі маємо

$$l(t) = \sqrt{\frac{2C_1 k_1}{\Delta_1} (H_1 + L - H_b) t + (\sigma L)^2} - \sigma L. \quad (7)$$

Для визначення змінних за часом швидкості фільтрації  $V(t)$  і витрати  $Q(t)$  маємо:

$$V(t) = k_1 \frac{H_1 + L - H_b}{\sigma L + l(t)} ; \quad (8)$$

$$Q(t) = F \cdot V(t) = F k_1 \frac{H_1 + L - H_b}{\sigma L + l(t)}. \quad (9)$$

У другому випадку (фільтрування при постійній швидкості  $V = V_0 = const$ ) одержуємо:

$$h_1(x) = \frac{V_0}{k_1} (x + \sigma L - L) + H_b, \quad h_2(x) = \frac{V_0}{k_2} x + H_b.$$

Рівняння для рухомої границі має вигляд:

$$l(t) = \frac{C_1 V_0}{\Delta_1} t. \quad (10)$$

В запропонованих методах фільтраційного розрахунку перебачається врахування осереднених значень коефіцієнтів фільтрації за період (тривалість) фільтрування (фільтроцикла) в зонах закольматованих двох шарів фільтру. Відомо, що в результаті кольматації (накопичення завислих речовин) у завантаженні фільтра, ущільнення і додаткового забруднення більш дрібними частками шару зовнішнього осаду за часом відбувається зменшення їх коефіцієнтів фільтрації і пористості.

В результаті проведеного аналізу результатів теоретичних і експериментальних досліджень для визначення осереднених коефіцієнтів фільтрації  $k_1, k_2$  пропонуються такі наближені залежності:

- при кольматації фільтру порівняно завислими речовинами з еквівалентним діаметром  $d_{екв}$  коефіцієнт фільтрації завантаження технологічно забрудненого фільтра визначається:

$$k_2 = k_{02} \left( 1 - \frac{b_{02}}{n_{02}} \right)^3 \approx 0,125k_{02}; \quad (11)$$

- в шарі осаду з крупних часток також можливе часткове забруднення дрібними частками, які не проникли у фільтр. У цьому випадку коефіцієнт фільтрації технологічно забрудненого осаду можна розрахувати за формулою

$$\bar{k}_1 = k_{01} \left( 1 - \frac{b_{01}}{n_{01}} \right). \quad (12)$$

Приймаємо  $b_{0i} = 0,5 n_{0i}$ ,  $k_{0i}$  – початкові коефіцієнти фільтрації незабруднених шарів завантаження фільтра.

Для визначення розрахункового коефіцієнту фільтрації шару осаду, який утворюється перед фільтром, пропонується також формула

$$k_1(t) = k_{01} e^{-3\beta t}, \quad (13)$$

де параметр  $\beta$  на підставі численних досліджень в натуральних умовах рекомендується в межах  $\beta = (1,5 \dots 3,0) \cdot 10^{-2}$  год<sup>-1</sup>.

Фільтрація у виробничих процесах у більшості випадків відбувається вертикально. Крім того, вважається, що лінійний закон фільтрації (Дарсі) в прифільтровій зоні при проходженні деформацій пористого завантаження не порушується. Відповідна гідродинамічна модель:

$$\frac{d\bar{b}}{dt} = \gamma(\bar{b}_0 - \varepsilon\bar{b})\bar{C} - \beta\bar{b}, \quad (14)$$

де  $\bar{C}$  – масова концентрація завислих частинок суспензії;  $\bar{b}$  – осереднена об'ємна концентрація частинок зависі, що сорбовані завантажен-

ням фільтру;  $\bar{b}_0$  – осереднена гранична кількість осаду, що може осісти в одиниці об'єму фільтруючого завантаження;  $\mathcal{E}$  – емпірична константа, що залежить від поруватості завантаження фільтра;  $\gamma$  – коефіцієнт швидкості кольматації;  $\beta$  – коефіцієнт швидкості зворотної масопередачі.

Фільтрація відбувається в двох зонах: у першому шарі завантаження фільтра і в другому.

В результаті діючих схем і підходів, за основу для подальшого розвитку й вивчення приймаємо фізичну концепцію або схему кольматажу фільтраційним потоком у шарі зернистого завантаження, що запропонована в роботі [1], на відміну від запропонованої схеми в нашому випадку приймається, що кольматація відбувається одночасно по всій глибині фільтру [6]:

$$(n_0 - b) \frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial b}{\partial t} = 0; \quad (15)$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} = \gamma(b_0 - kb)C - \beta b. \quad (16)$$

Вихідна система рівнянь:

$$n_0 \frac{\partial C_1}{\partial t} = -V_0 \frac{\partial C_1}{\partial x} - K_3 C_1; \quad n_0 \frac{\partial C_3}{\partial t} = -V_0 \frac{\partial C_3}{\partial x} + K^* C_1 - K_2 C_3,$$

де  $K_2 = \gamma(\sigma_{\max} - \sigma_3) = const$  і  $K_3 = K_1 + K^*$ .

Початкові та граничні умови:  $C_1(x, 0) = C_1^0$ ,  $C_1(0, t) = C_{0_1}$ ,  
 $C_3(x, 0) = C_3^0$ ,  $C_3(0, t) = C_{0_3}$ .

В результаті використання інтегрального перетворення Лапласа по тимчасовій змінній  $t$

$$\tilde{F}(s) = \int_0^{\infty} F(t) e^{-st} dt \quad (17)$$

отримуємо в області зображення Лапласа таку систему звичайних диференціальних рівнянь:

$$V_0 \frac{d\tilde{C}_1}{dx} + (K_3 + sn_0)\tilde{C}_1 = n_0 C_1^0; \quad (18)$$

$$V_0 \frac{d\tilde{C}_3}{dx} + (K_2 + sn_0)\tilde{C}_3 - K^* \tilde{C}_1 = n_0 C_3^0.$$

з граничними умовами:  $\tilde{C}_1(0, s) = \frac{C_{0_1}}{s}$ ,  $\tilde{C}_3(0, s) = \frac{C_{0_3}}{s}$ .

В результаті використання інтегрального перетворення Лапласа по просторовій змінній  $x$

$$\tilde{F}(p) = \int_0^{\infty} F(x) e^{-px} dx \quad (19)$$

отримуємо в області зображення Лапласа  $(p, s)$  систему алгебраїчних рівнянь:

$$(V_0 p + sn + K_3) \tilde{C}_1 = \frac{n_0 C_1^0}{p} + V_0 \frac{C_{0_1}}{s}, \quad (20)$$

$$(V_0 p + sn + K_2) \tilde{C}_3 - K^* \tilde{C}_1 = \frac{n_0 C_3^0}{p} + V_0 \frac{C_{0_3}}{s}.$$

Її рішення має вигляд:

$$\tilde{C}_1 = \frac{n_0 C_1^0}{p(V_0 p + sn_0 + K_3)} + \frac{C_{0_1} V_0}{s(V_0 p + sn_0 + K_3)}, \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \tilde{C}_3 = & \frac{n_0 C_1^0 K^*}{p(V_0 p + sn_0 + K_3)(V_0 p + sn_0 + K_2)} + \frac{C_{0_1} V_0 K^*}{s(V_0 p + sn_0 + K_3)(V_0 p + sn_0 + K_2)} + \\ & + \frac{n_0 C_3^0}{p(V_0 p + sn_0 + K_2)} + V_0 \frac{C_{0_3}^0}{p(V_0 p + sn_0 + K_2)}. \end{aligned} \quad (22)$$

В результаті двократного використання оборотного перетворення Лапласа отримуємо:

$$C_1(x, t) = C_1^0 e^{-\frac{K_3 t}{n_0}} - C_1^0 e^{-\frac{K_3 t}{n_0}} \eta\left(t - \frac{n_0}{V_0} x\right) + C_{0_1} e^{-\frac{K_3 x}{V_0}} \eta\left(t - \frac{n_0}{V_0} x\right), \quad (23)$$

$$\begin{aligned} C_3(x, t) = & \frac{C_1^0 K^*}{K_2 - K_3} \left( e^{-\frac{K_3 t}{n_0}} - e^{-\frac{K_2 t}{n_0}} \right) \left( 1 - \eta\left(t - \frac{n_0}{V_0} x\right) \right) + C_3^0 e^{-\frac{K_2 t}{V_0}} \left( 1 - \eta\left(t - \frac{n_0}{V_0} x\right) \right) + \\ & + C_{0_1} K^* e^{-\frac{K_3 x}{V_0}} - e^{-\frac{K_2 x}{V_0}} \eta\left(t - \frac{n_0}{V_0} x\right) + C_{0_3} e^{-\frac{K_2 x}{V_0}} \eta\left(t - \frac{n_0}{V_0} x\right). \end{aligned} \quad (24)$$

Для випадку  $t > \frac{n_0}{V_0} x$  маємо:

$$C_1(x, t) = C_1^0 e^{-\frac{K_3 x}{V_0}}, \quad (25)$$



$$C_3(x, t) = C_{01} K^* \frac{e^{-\frac{K_3}{V_0} x} - e^{-\frac{K_2}{V_0} x}}{K_2 - K_3} + C_{03} e^{-\frac{K_2}{V_0} x}. \quad (26)$$

Аналіз показав, що надійність і достовірність розрахунку технологічних і конструктивних параметрів очисних фільтрів у зазначених умовах їх роботи значною мірою залежить від визначення змінних у часі за рахунок кольматації коефіцієнтів фільтрації шарів завантаження. Тому подальше дослідження щодо їх визначення необхідно продовжити.

1.Веригин Н.Н. Кольматация радиальных фильтров с активированным углем. – М.: Стройиздат, 1971. – 169 с.

2.Ми́нц Д.М., Мельцер В.З. Гидравлическое сопротивление зернистой пористой среды в процессе кольматации // Доклады АН СССР. – 1970. – Т.192. – №2. – С.25-29.

3.Ми́нц Д.М. Гидравлика зернистых материалов. – М.: Стройиздат, 1955. – 300 с.

4.Кисилев С.К. Моделирование и расчеты обезжелезивания воды на очистных фильтрах с учетом изменения гидравлических свойств загрузки: Дисс. ... канд. техн. наук. – К., 2000. – 161 с.

5. Олійник Е.О., Величко С.В. Фільтраційний розрахунок очисних фільтрів в умовах утворення осаду на його поверхні // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Наук.-техн. зб. Вип.8. – К., 2008. – С. 42-46.

6.Олійник О.Я., Сорокін С.М. Моделювання фільтрування неоднорідної суспензії з утворенням шару осаду // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Наук.-техн. зб. Вип.6. – К., 2006. – С.34-38.

Отримано 28.12.2009

УДК 628.16

И.Н.ЧУБ

Харьковская национальная академия городского хозяйства

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДА РАСЧЕТА КАТИОНИТОВОГО ФИЛЬТРА

Обсуждается разработанный метод расчета катионитового фильтра. Приводится сравнение предложенного метода с существующими методами. Дана оценка полученным результатам.

Обговорюється розроблений метод розрахунку катіонітового фільтру. Виконано порівняння цього методу з існуючими методами. Дано оцінку отриманим результатам.

In the article the dependencies for the sodium-cation filter calculation was proposed. The technique of the operational parameters was developed. The developed method of the sodium-cation filters calculation has been compared with others well-known methods.

*Ключевые слова:* катионитовый фильтр, умягчение, рабочая емкость, период фильтроцикла, скорость фильтрования, рабочая зона.

В технологии водоподготовки для умягчения воды применяют