

УДК 628.515

© О.О. Садчиков, аспірант

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНКИ ВТРАТ НАПОРУ У ДВОШАРОВОМУ ФІЛЬТРИ ПРИ ЗНЕЗАЛІЗНЕННІ ВОДИ

Виконано моделювання і розрахунок втрат напору на двошарових фільтрах при знезалізненні води. Сформульована і обґрунтована математична модель втрат напору у двошарових фільтрах при знезалізненні води. Наведені рекомендації для розрахунку.

Ключові слова: знезалізнення води, двошарові очисні фільтри, втрати напору

У межах фільтроциклу зростання втрат напору по висоті завантаження очисного фільтра, як правило, відбувається нерівномірно. Внаслідок каталітичної реакції відбувається окислення двохвалентного заліза Fe^{2+} , яке надходить з підземною водою на фільтр, і утворюються сполуки заліза у вигляді осаду гідроксиду заліза, який накопичується в порах завантаження. При цьому в разі однорідного фільтра більша частина осаду затримується у верхній частині фільтра і зовсім недостатньо — в нижній частині. Таким чином, вилучення заліза і накопичення осаду, а також втрати напору по висоті фільтра відбуваються нерівномірно при значному завантаженні його роботи у верхній частині. Все це в цілому призводить до зниження ефективності роботи очисних фільтрів з однорідним завантаженням.

Однією з основних технологічних характеристик очисного фільтра, яку необхідно визначити, є втрата напору Δh при вилученні забруднень різного походження. Внаслідок накопичення осаду в завантаженні фільтра зменшується його коефіцієнт фільтрації і щільність, збільшується гідравлічний опір фільтра, що призводить до збільшення втрат напору і, в загальному випадку, до зменшення швидкості фільтрації.

Теоретичні дослідження втрат напору були широко вивчені О.Я. Олійником, А.М. Тугаєм, С.К. Кисельовим, В.И. Станкявичус та іншими, але вони стосувались тільки однорідних очисних фільтрів. Дослідження втрат напорів на двошарових фільтрах вивчалися тільки експериментальним шляхом, для окремих випадків.

За основу була прийнята загальна модель О.Я. Олійника, А.М. Тугая [4].

Основним базовим рівнянням для рішення цієї гідродинамічної задачі (моделі), як відомо, будуть рівняння фільтраційного потоку і рівняння нерозривності [1].

В умовах руху забруднених вод у фільтрах коефіцієнт фільтрації за рахунок утвореного осаду в завантаженні шарів фільтра буде змінюватись, внаслідок чого відоме рівняння фільтрації в цьому випадку матиме такий вигляд (закон Дарсі):

$$V(x,t) = -k(\sigma, x, t) \frac{\partial h(x,t)}{\partial x}, \quad (1)$$

а рівняння нерозривності, яке при постійній густині рідини $\rho_p = \text{const}$, площі фільтра $S = \text{const}$, початковій пористості завантаження $n_0 = \text{const}$, буде мати вигляд [1,2]:

$$\frac{\partial \tilde{\sigma}}{\partial t} - \frac{\partial V}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

де $\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{\delta}$, δ – густина твердого осаду масової концентрації в одиниці об'єму осаду; σ – масова концентрація (кількість) осаду гідроксиду заліза в твердій (нерухомій) фазі в одиниці об'єму фільтра.

Відомо [1,2], що найбільш ефективним технологічним режимом буде робота фільтра в умовах підтримання постійної швидкості фільтрування в шарах фільтра. При такому режимі роботи фільтра необхідно збільшувати напір на вході у фільтр на величину отримання втрат напору.

В результаті проведеного нами аналізу існуючих лабораторних дослідів процесу знезалізнення у фільтрах з різними типами завантаження залежність коефіцієнта фільтрації очисного фільтра при кольматації його осадом гідроксиду заліза можна представити у наступному безрозмірному вигляді з врахуванням відомих технологічних і інших параметрів A , n_0 і σ_{max}

$$k(x,t,\sigma) = -k_0(x) \cdot e^{\frac{\alpha_0 A \bar{\sigma}(x,t)}{1-A\bar{\sigma}(x,t)}}, \quad \bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{max}}; \quad (3)$$

$$\alpha_0 = \frac{\alpha \sigma_{max} (1 - 0,5A)}{A} \quad \text{при } \bar{\sigma} \leq 0,5; \quad (4)$$

$$\alpha_0 = \frac{\alpha \sigma_{max} (1 - A)}{A} \quad \text{при } \bar{\sigma} > 0,5 \quad (5)$$

n_0 – початкова пористість чистого фільтра;

α – дослідний параметр, який залежить від матеріалу завантаження і має розмірність, зворотну розмірності σ ;

$A = \frac{\sigma_{max}}{\delta n_0}$ – коефіцієнт граничного накопичення осаду, тобто відношення граничного

питомого об'єму осаду до початкової пористості чистого завантаження, σ_{max} – гранична концентрація осаду в одиниці об'єму фільтра.

Тоді для визначення втрат напору у двошаровому фільтрі маємо рівняння

$$\begin{aligned} \Delta h(x,t) &= \Delta h_1 + \Delta h_2 = V_0 \int_0^l \frac{d\eta}{k_1(x,t,\sigma_1)} + V_0 \int_l^L \frac{d\eta}{k_2(x,t,\sigma_2)} = \\ &= \frac{V_0}{K_{01}} \int_0^l e^{W_1} d\eta + \frac{V_0}{K_{02}} \int_l^L e^{W_2} d\eta \end{aligned} \quad (6)$$

де $W_i = \frac{\alpha_{0i} A_i \sigma_i(\eta, t)}{1 - A_i \sigma_i(\eta, t)}$

Відповідно [4] це рівняння можна також записати у формі:

$$\frac{\Delta h}{\Delta h_0} = \int_0^{\bar{\eta}} \frac{d\eta}{\bar{k}_1(\sigma_1)} + \int_{\bar{\eta}}^1 \frac{d\eta}{\bar{k}_2(\sigma_2)}, \quad (7)$$

$$\bar{\eta} = \frac{\eta}{L}$$

$\Delta h_0 = H_0 - H_2$ – початкові втрати напору у фільтрі;

$\Delta h = H - H_2$ – розрахункові втрати напору у фільтрі;

H, H_0 – відповідно розрахунковий і початковий напір на верхній границі фільтра;

H_2 – постійний напір на нижній границі фільтра;

$\bar{K}_i = \frac{k_i}{k_c}, k_c = \frac{V_0 L}{\Delta h_0}$ – ефективний коефіцієнт фільтрації чистого завантаження фільтра.

З рівняння (6) слідує, що загальні втрати напору у двошаровому фільтрі будуть складатися із суми втрат напору у кожному шарі Δh_1 і Δh_2 відповідно на ділянках l і $L-l$. Для визначення цих втрат можна скористатись рішенням при відповідних граничних умовах наведених рівнянь в умовах жорсткого режиму фільтрації. Для випадку однорідного фільтра це рішення, яке буде використано в подальшому аналізі, наведено в роботах [1]. В якості прикладу розрахунку наведемо результати розрахунку загальних втрат напору у верхньому шарі фільтра Δh_1 за запропонованою точною методикою. Ці результати показані на графіках $\frac{\Delta h_1 k_{01}}{l V_0} = f(\bar{t}, S_1)$, які наведені на рис. 3 в роботі [1] при $\bar{C}_{01} = \frac{C_{01}}{C_n} = 0,5, 0,75, 1,0, A_l = 0,5,$

$\alpha_{01} = 5, C_{p01} = 0.$

Аналіз цих графіків показує, що із збільшенням параметру $S_1 = \frac{\gamma_1 \sigma_{\max 1}}{K_1}$ втрати напору

будуть збільшуватись, а через деякий час $\bar{t} = \frac{K_1}{n_{01}} t$ зростання втрат напору майже не від-

бувається.

Нагадаємо, що при визначенні втрат напору у нижньому шарі можна також скористатись рішенням задачі для однорідного фільтра, приймаючи в ньому замість граничних концентрацій C_{l0} і C_{p1} їх значення на границі $x=l, C_l(l) = C_{p1}(l)$, при цьому треба також враховувати технологічні характеристики нижнього шару $A_2, \alpha_{02}, \sigma_{\max 2}$.

На підставі аналізу загального рішення задачі можна визначити такі окремі випадки і висновки:

1. Рівняння (6) і запропоноване його рішення дозволяє визначити втрати напору як в окремих шарах фільтру, так і в цілому у двошаровому фільтрі.

2. Якщо після промивки в шарах фільтра залишився невилучений осад середньою концентрацією в шарах σ_{C1}^0 і σ_{C2}^0 , то при подальшій експлуатації фільтра залишкові втрати напору в шарах потрібно збільшити загальний початковий опір на величину Δh_n .

$$\Delta h_n(L) = \Delta h_0(l)W_{01} + \Delta h_0(L-l)W_{02} \quad (8)$$

де $W_{0i} = e^{\frac{\alpha_{0i}A_i\sigma_{ci}}{1-A_i\sigma_{ci}}}$,

$\Delta h_0(l) = \frac{V_0}{k_{01}}l$ і $\Delta h(L-l) = \frac{V_0}{k_{02}}(L-l)$ — відповідно втрати напору в шарах чистого фільтра ($\sigma_i^0 = 0$).

При відомих втратах напору Δh_i в шарах фільтра згідно з рівнянням (8) можна визначити кількість невилученого осаду після промивки в цих шарах σ_{Ci}^0 .

3. При граничному наповненні осадом об'єму шарів фільтра ($\sigma_i = \sigma_{maxi}$), маємо

$$\Delta h(L)_{max} = \Delta h_0(l) \cdot e^{\frac{\alpha_{01}A_1}{1-A_1}} + \Delta h_{02}(L-l) \cdot e^{\frac{\alpha_{02}A_2}{1-A_2}} \quad (9)$$

4. В результаті проведеного аналізу в подальшому з метою спрощення розрахунку загальних втрат напору у двошаровому фільтрі пропонується залежність

$$\Delta \bar{h}(\bar{l}, \bar{t}) = \beta_1 \bar{l} W_{C1} + \beta_2 (\bar{L} - \bar{l}) W_{C2}, \quad (10)$$

де $W_{Ci} = e^{\frac{\alpha_{0i}A_i\bar{\sigma}_{ci}(\bar{t}_i)}{1-A_i\bar{\sigma}_{ci}(\bar{t}_i)}}$, $\bar{\sigma}_{Ci} = \frac{\sigma_{Ci}}{\sigma_{maxi}}$ — осереднене значення концентрацій осаду в шарах фільтра,

рекомендації з визначення яких наведені в роботі [1], β_i — поправочний коефіцієнт, методику визначення якого наведено нижче.

Для визначення поправочного коефіцієнта β_i скористаймося порівняльним аналізом численних розрахунків, які наведені в роботі [1], для однорідного фільтра за точною формулою і наближеною формулою з поправочним коефіцієнтом β (10). На рис. 3,4, які наведені в роботі [1], для різних значень довжини верхнього шару \bar{l} наведені приклади графіків $\Delta \bar{h}(\bar{l}, \bar{t})$, $\bar{\sigma}_{C1}(\bar{l}, \bar{t})$, побудовані при $S_1=0,6$, $S_2=0,5$, $S_3=0,5$, $S_4=0,97$, $\bar{C}_{01} = 0,5$, $A_1=0,5$, $a_{01}=5$, $\sigma_1^0 = 0,1$, $n_c=0,4$ [1].

Внаслідок проведеного порівняльного аналізу для визначення коефіцієнта β_i пропонуються такі практичні рекомендації.

У всіх випадках кожного шару фільтра з різною довжиною при $\bar{t} \leq 4500$ можна прийма-

ти $\beta_i = 1$, тобто наближена і точна формула з визначення загальних втрат напору Δh_i дають майже однакові результати. Так, якщо вважати $\bar{t}_i = \frac{K_i}{n_{Ci}} t$, а K_i – змінюється залежно від типу завантаження, частини якого повністю покриті залістистою плівкою з гідроксиду заліза в межах $K_i = 20 \dots 45$ м год⁻¹, а значення розрахункової пористості $n_{Ci} = n_{oi}(1 - 0,5A_i) = 0,25 \dots 0,35$, то період роботи фільтра, коли можна приймати $\beta_i = 1$, становить десь до $t = 15 \dots 30$ годин.

5. При $\bar{t} > 10000$, як показав виконаний аналіз, накопичення осаду в шарах фільтра майже припиняється. Коефіцієнт β_i буде залежати від довжини шару фільтра \tilde{l}_i і параметра \tilde{S}_{li} . Визначення коефіцієнта β_i в цьому випадку здійснюється за графіком $\beta_i(\tilde{l}_i, S_{li})$, який наведено в роботі [1], де $\tilde{l}_1 = \frac{l_i}{V_0} K_1$, $\tilde{l}_2 = \frac{\tilde{L} - \tilde{l}_1}{V_0} K_2$, $K_i = K_{li} + K_i^*$.

6. Таким чином, в межах $4500 < \bar{t}_i < 10000$ коефіцієнт β_i буде залежати від параметрів $\bar{t}_i, \tilde{l}_i, S_{li}$, тобто змінюватись $\beta < \beta(\bar{t}_i, \tilde{l}_i, S_{li}) < \beta(\tilde{l}_i, S_{li})$.

Тому в цьому випадку можна прийняти наближену формулу для визначення $\beta(\bar{t}_i, \tilde{l}_i, S_{li})$ у вигляді

$$\beta(\bar{t}_i, \tilde{l}_i, S_{li}) = \beta_i + [\beta(\tilde{l}_i, S_{li}) - \beta_i] \cdot \frac{\bar{t}_i - \bar{t}_{li}}{t_{2i} - \bar{t}_{li}}, \quad (11)$$

де відповідно \bar{t}_{li} і \bar{t}_{2i} відповідають значенням β_i і $\beta(\tilde{l}_i, S_{li})$, тобто $\bar{t}_{li} \leq 4500$ і $\bar{t}_{2i} > 10000$.

Як уже зазначалось вище, інтенсивність вилучення заліза, а в зв'язку з цим накопичення осаду і темп зростання втрат напору по висоті фільтра будуть неоднорідними. Спочатку більш інтенсивно втрати напору зростають у верхній частині фільтра, де накопичується більше осаду, і зменшуються в нижній частині, де накопичення осаду зменшується за рахунок зниження інтенсивності вилучення заліза. В цьому випадку величина втрат напору зростає дуже повільно і при деяких значеннях t настає стабілізація, і втрати напору за рахунок ущільнення і відриву часток, а також зниження сорбційно-окислювальних процесів не збільшуються, а навіть зменшуються.

Це фізично пояснений факт досить переконливо підтверджується експериментальними дослідженнями. Проте час стабілізації і відповідна йому величина Δh будуть значно більші тих, які рекомендується приймати технологією.

У зв'язку з тим, що в нижній частині інтенсивність вилучення заліза різко падає, то для одержання нормативної концентрації заліза у фільтраті в разі однорідного фільтра потрібно збільшувати його висоту, тому виникає необхідність влаштування двошарового фільтра, нижній шар якого забезпечить більш ефективно і економічно вилучення заліза.

Список використаної літератури

1. Олійник О.Я., Кисельов С.К. Теоретичні дослідження втрат напору на очисних фільтрах при знезалізованні води // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – Наук. тех. збірник. – вип. 1. – 2003 с. 3 – 12.
2. Киселев С.К. Моделирование и расчеты обезжелезивания воды на очистных фильтрах с учетом изменения гидравлических свойств загрузки // Дис. канд. техн. наук, 05.23.04. – К. – 2000. – 158 с.
3. Тугай А.М., Оліник О.Я., Тугай Я.А. Продуктивність свердловин в умовах кольматажу / посібник. – Харків, ХНАМГ, - 2004. – 240 с.
4. Поляков В.Л. Расчет осветления суспензий в двухслойной загрузке // Вісник Одес. держ. академії буд. і арх., - вип. 19 – с. 194 – 202.

Стаття надійшла до редакції 25.04.13 українською мовою

© О.О. Садчиков

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТЫ ПОТЕРЬ НАПОРА
В ДВУХСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРАХ ПРИ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИИ ВОДЫ**

Выполнено моделирование и расчеты потерь напора в двухслойных фильтрах при обезжелезивании воды. Сформулирована и обоснована математическая модель потерь напора в двухслойном фильтре при обезжелезивании воды. Приведены рекомендации для расчета.

© O.O. Sadchykov

**SIMULATION MODEL AND CALCULATIONS OF PRESSURE LOSS
INSIDE TWO-LAYER FILTER DURING IRON REMOVING FROM WATER**

Simulation model and calculations of pressure loss inside two-layer filter during iron removing from water. Formulation and substantiation of mathematic model of pressure loss inside two-layer filter during iron removing from water. Providing recommendation for engineering calculation.