УДК 628.16

В.М. Волков[1], С.М. Епоян[2], А.С. Карагяур[2], С.П. Бабенко[2]

[1]*Комунальне підприємство «Харківводоканал», Україна*
[2]*Харківський національний університет будівництва та архітектури, Україна*

ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ОБОЛОНОК ДРЕНАЖНИХ СИСТЕМ ШВИДКИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ ДООЧИЩЕННЯ

Представлені результати теоретичних досліджень процесу послідовного фільтрування малоконцентрованої суспензії через шар фільтруючого зернистого завантаження і пористу перегородку з волокнистих полімерних матеріалів. Розглянуто фільтрування з поступовим закупорюванням пір пористої перегородки, що мають змінний розмір. Дослідження проведені за допомогою математичного моделювання.

Ключові слова: *зернисте фільтруюче завантаження, завислі речовини, дренажна система, пориста перегородка, полімерна волокниста оболонка, математична модель.*

Постановка проблеми

Енерго- та ресурсозбереження є важливою проблемою при підготовці води для господарсько-питних потреб. Зменшення експлуатаційних витрат при роботі основного устаткування та споруд дозволить уповільнити зростання вартості послуг із забезпечення водою питної якості. Значна частина населених пунктів України забезпечується водою з поверхневих джерел. Для таких систем водопостачання найчастіше передбачається двоступенева схема підготовки, де на стадії доочищення застосовуються швидкі фільтри із зернистим завантаженням. Унаслідок зарегульованості багатьох поверхневих джерел водопостачання основна частина навантаження при очищенні від тонкодисперсних завислих і колоїдних речовин припадає на фільтрувальні споруди. Витрати, пов'язані з експлуатацією цих споруд, складають значну частину в загальній вартості очищення. Дані витрати обумовлені необхідністю періодичної регенерації зернистого завантаження, що кольматується в процесі фільтрування [1-3]. Для цієї операції витрачається велика кількість промивної води питної якості, яка подається хоч і нетривалий час, але з інтенсивністю, що практично в десять разів перевищує подачу в режимі очищення. Одним із напрямків скорочення об’ємів промивної води є збільшення фільтроциклу споруди, а саме тривалості її роботи в режимі фільтрування.

Швидкий фільтр відключається на промивку, коли виконується одна з двох умов: якість фільтрату знижується нижче допустимого рівня або втрати напору в зернистому завантаженні досягають критичного значення. На практиці з міркувань санітарної надійності намагаються дотримуватися таких параметрів, при яких друга умова настає раніше [4]. При застосуванні одношарового завантаження досягнення втратами напору граничних значень відбувається набагато раніше, ніж погіршується якість фільтрату. Перші у напрямку фільтрування шари зернистого завантаження швидко кольматуються, отже, втрати напору різко зростають, фільтр необхідно вимикати на регенерацію, при цьому наступні (нижні) шари залишаються незабрудненими. Відповідно, розробка конструктивних і технологічних рішень, що дозволяють більш рівномірно розподілити забруднення по товщині зернистого шару, є актуальним завданням, оскільки дозволять більш раціонально використовувати здатність фільтруючого завантаження до вилучання забруднень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Поширеним способом синхронізації досягнення втратами напору граничних значень і критичного зниження якості фільтрату є застосування двошарового, наприклад, антрацито-кварцового завантаження [2, 4, 5]. Через велику вартість антрацитового завантаження для першого шару також можуть застосовуватися дроблена скорлупа кокоса [6, 7], гранули полівінілхлориду [7-9], бітумне вугілля [7], деревне вугілля [10]. Для першого (верхнього) шару використовується матеріал з більшою крупністю зерен, для другого (нижнього) шару - з меншою крупністю. У цьому випадку до матеріалів шарів фільтруючого завантаження, крім високої пористості і стійкості до стирання, висувається умова різниці щільності для запобігання перемішування при промивці.

© Волков В.М., Епоян С.М., Карагяур А.С., Бабенко С.П.

Виконання всіх трьох вимог обмежує вибір серед існуючих зернистих матеріалів природного або штучного походження. Крім того, менш щільний верхній шар при промивці більше розширюється, що обумовлює необхідність більш високого розташування жолобів і збільшує ймовірність виносу зерен завантаження.

Уникнути цих недоліків можливо при застосуванні: послідовного фільтрування через ряд апаратів з різноманітним зернистим завантаженням [11, 12]; багатопотокового фільтрування [13], а також при здійсненні фільтрування і промивки в перпендикулярних напрямках [14]. У цих випадках можлива роздільна промивка кожного шару (фільтра) по мірі забруднення. Однак, для реалізації подібних рішень потрібне ускладнення або технологічної схеми, або конструкції споруди.

Альтернативою описаним вище способам удосконалення фільтрів із зернистим завантаженням є застосування в якості фільтруючого завантаження волокнистих матеріалів. Проведені експериментальні дослідження показали, що фільтри з волокнисто-пористого поліетилену за якістю очищення не поступаються фільтрам з піщаним завантаженням або завантаженням із пінополістиролу [15]. Крім того, волокнисті матеріали мають набагато більшу пористість у порівнянні з зернистими, виключається винесення і перемішування часток фільтруючого завантаження при промивці, можливе виготовлення пористих перегородок зі змінним розміром пір.

У сучасних швидких фільтрах широкого поширення набули полімерні дренажні системи, що містять у своїй конструкції оболонку з пористих волокнистих матеріалів [16]. Нами пропонується використати такі дренажі не тільки для затримання часток зернистого шару та рівномірного розподілу промивної води, але і для доочищення води, що пройшла через шар зернистого завантаження. Це дозволяє застосовувати зернистий матеріал з більшою крупністю зерен, що сприяє більш рівномірному розподілу забруднень по товщині шару. За допомогою математичного моделювання доцільність і ефективність даного рішення було обґрунтоване для двох варіантів фільтрування: з утворенням шару осаду на поверхні пористої перегородки та з поступовим закупорюванням її пір [17, 18]. Розмір пір і товщина полімерної оболонки дренажних систем впливає не тільки на якість очищення, а й на величину гідравлічного опору: зі збільшенням товщини перегородки і зменшенням розмірів пір підвищується її здатність вилучати забруднення, але значно зростає опір. У зв'язку з цим є доцільним розглянути застосування пористої перегородки зі змінним розміром пір для рівномірного розподілу забруднень по її товщині.

Формулювання мети статті

Метою статті є вивчення за допомогою математичного моделювання процесу послідовного фільтрування води, що містить завислі речовини, через шар зернистого завантаження і шар пористої перегородки з волокнистого полімерного матеріалу зі змінним розміром пір.

Виклад основного матеріалу

Для спрощення математичної моделі приймемо такі спрощення та припущення:

1) Дренажна система являє собою плоску горизонтальну пористу перегородку, через яку рівномірно фільтрується вода, що очищається. Такий підхід дозволяє моделювати процес за допомогою одномірних рівнянь, записаних у прямокутній системі координат.

2) Протягом часу фільтруюча здатність зернистого завантаження та пористої оболонки дренажної системи змінюється тільки в результаті поступового закупорювання її пір частками суспензії.

3) Рух рідини, що очищається, через шар фільтруючого завантаження і пористу перегородку відбувається в ламінарному режимі.

4) Внесок дифузії в перенесення завислих речовин при фільтрації в нерухомому шарі зернистого завантаження та пористій оболонці дренажної системи малий у порівнянні з іншими складовими.

5) Кінетика зміни концентрації завислих речовин у фільтруючому завантаженні і пористій перегородці описується лінійною залежністю.

6) При проходженні шару зернистого завантаження з однаковою ймовірністю затримуються всі частинки суспензії незалежно від розміру, тому можна прийняти розподіл часток суспензії за розмірами у воді, що поступає на пористу перегородку, таким же, як і у вихідній.

7) На початку фільтроциклу залишкова концентрація завислих речовин у зернах завантаження та порах волокнистої перегородки дорівнює нулю.

Основу математичної моделі складають:

1) рівняння фільтрації, записане у вигляді [19]:

$$\frac{1}{F}\frac{dW(t)}{dt} = \frac{\Delta p(t)}{\mu\ R_{з.з.}(t) + R_{п.п.}(t)}, \qquad (1)$$

де $W(t)$ – об'єм очищеної води, м^3; F – площа поверхні фільтрації, м^2; $\Delta p(t)$ – різниця тисків (напору), Па; μ – динамічна в'язкість, Па·с; $R_{з.з.}(t)$ – опір шару зернистого завантаження, м$^{-1}$; $R_{п.п.}(t)$ – опір пористої перегородки, м$^{-1}$; t - час, с; $Q(t) = \frac{dW(t)}{dt}$ - продуктивність фільтру, м^3/с.

2) рівняння переносу завислих часток завісі потоком рідини, що фільтрується:

$$n_{з.з.}(z,t)\frac{\partial C(z,t)}{\partial t}+V(t)\frac{\partial C(z,t)}{\partial z}+\frac{\partial S(z,t)}{\partial t}=0\,, \quad (2)$$

3) рівняння масопередачі часток завісі з води у тверду фазу зернистого завантаження (або волокнистого матеріалу перегородки):

$$\frac{\partial S(z,t)}{\partial t}=b(t)C(z,t)-a(t)S(z,t)\,, \quad (3)$$

де z - вертикальна координата, м, яка змінюється в діапазоні від 0 до $h_{з.з.}$ для зернистого завантаження або від 0 до $h_{п.п.}$ для пористої перегородки; $h_{з.з.}$ - товщина шару зернистого завантаження, м; $h_{п.п.}$ - товщина пористої перегородки, м; C(z, t) – концентрація часток завісі у рідині, що фільтрується, кг/м^3; S(z, t) – концентрація часток завісі, затриманих на зернах фільтруючого завантаження, кг/м^3; $V(t)=\frac{1}{F}\frac{dW(t)}{dt}$ - швидкість фільтрування, м/с; a(t) и b(t) – коефіцієнти, відповідно, відриву і прилипання часток завісі до зерен завантаження, с$^{-1}$.

Коефіцієнти a(t) і b(t) визначаються за залежностями:

$$a(t)=\frac{V(t)}{d_{з.з.}}\alpha\,;\ b(t)=\frac{\beta}{V(t)^{0,7}\,d_{з.з.}^{1,7}}V(t)\,, \quad (4)$$

де α і β - коефіцієнти, що враховують фізико-хімічні властивості зерен завантаження і суспензії, що фільтрується через нього.

Припустимо, що залежність (4) можна застосувати для розрахунку кінетичних коефіцієнтів a(t) та b(t) при фільтруванні через пористу перегородку. Для цього замість розмірів зерен завантаження $d_{з.з.}$ слід підставляти розмір її пір $d_{п.п.}$

Опір шару зернистого завантаження $R_{з.з.}$, а також пористої перегородки $R_{п.п.}$, що змінюються в результаті кольматації, дорівнюють

$$R_{з.з.}=h_{з.з.}\,\bar{r}_{з.з.}(t)\,,\ R_{п.п.}=h_{п.п.}\,\bar{r}_{п.п.}(t)\,, \quad (5)$$

где

$$\bar{r}_{з.з.}(t)=\frac{1}{h_{з.з.}}\int_0^{h_{з.з.}} r_{з.з.}(z,t)dz\,,\ \bar{r}_{п.п.}(t)=\frac{1}{h_{п.п.}}\int_0^{h_{п.п.}} r_{п.п.}(z,t)dz\,-$$

середній питомий опір шару зернистого завантаження або пористої перегородки, м$^{-2}$.

Питомий опір зернистого завантаження до початку кольматації можна оцінити за допомогою рівняння Козені-Кармана [19]:

$$r_{0з.з.}=k_1F_{пит.з.з.}^2\frac{(1-n_{0з.з.})^2}{n_{0з.з.}^3}\,, \quad (6)$$

де $n_{0з.з.}$ – пористість незакольматованого зернистого завантаження; $F_{пит.з.з.}=\frac{6\Phi}{d_{з.з.}}$ – питома поверхня зерен завантаження, м$^{-1}$; Ф – коефіцієнт форми, для кулястих часток Ф = 1; k_1 – відношення довжини пір до розмірів пори; $d_{з.з.}$ – еквівалентний діаметр зерен завантаження, м.

Залежність (6) отримана для зернистого матеріалу, для волокнистого матеріалу, характеристикою якого є еквівалентний діаметр пори $d_п$, дана формула вимагає уточнення.

Формула (5) виведена з рівняння Хагена-Пуазейля, що описує усталений рух в'язкої нестисливої рідини в тонкій циліндричній трубці (капілярі) [20]:

$$Q_п=\frac{\pi d_п^4\Delta p}{128\mu L}\,, \quad (7)$$

де L - довжина капіляра, м.

Об'єм і площа внутрішньої поверхні капіляра, відповідно, дорівнюють

$$W_п=\frac{\pi d_п^2}{4}L,\ \ F_п=\pi d_п L. \quad (8)$$

З урахуванням залежностей (8) діаметр капіляра дорівнює

$$d_п=\frac{4W_п}{F_п}=\frac{4W_п}{F_{пит.п.п.}W_п}=\frac{4}{F_{пит.п.п.}}\,, \quad (9)$$

де – $F_{пит.п.п.}=\frac{6\Phi}{d_{п.п.}}$ питома поверхня пор пористої перегородки, м$^{-1}$.

Кількість капілярів в об'ємі тіла з волокнистого матеріалу

$$N_к=\frac{\Sigma W_п}{W_п}=\frac{4Fn_{0п.п.}}{k_1\pi d_п^2}\,, \quad (10)$$

де $n_{0п.п.}$ – пористість незакольматованої пористої перегородки.

З урахуванням (7), (9) та (10) витрата води через всі капіляри пористої перегородки дорівнює

$$\Sigma Q_п=N_кQ_п=\frac{\Delta p}{\mu L}\cdot\frac{n_{0п.п.}}{2k_1F_{уд.п.п.}^2}\,. \quad (11)$$

Приймаючи $R_{з.з.}=0$, $L=h_{п.п.}$, враховуючи залежність (5), а також об'єднавши коефіцієнти 2 і k_1, порівняємо вирази (1) і (11). У результаті отримаємо формулу для розрахунку питомого опору пористої перегородки:

$$r_{0п.п.}=\frac{k_1F_{пит.п.п.}^2}{n_{0п.п.}}\,. \quad (12)$$

Зміну пористості в результаті кольматації визначимо за допомогою залежності:

$$n(z,t)=n_0-\frac{S(z,t)}{\gamma}\,, \quad (13)$$

де γ - концентрація твердих часток завісі в осаді, кг/м^3.

Для визначення впливу кольматації на питомий опір шару зернистого завантаження скористаємося такими міркуваннями. При накопиченні осаду в

завантаженні змінюється не тільки пористість, але і питома поверхня зерен, яка дорівнює

$$F_{пит.з.з.} = \frac{F_{з.з.}}{W_{з.з.}} = \frac{F_{з.з.}}{W_{ф.ш.}(1-n)}, \qquad (14)$$

де $F_{з.з.}$, $W_{з.з.}$ - відповідно, площа поверхні, м^2, та об'єм зерен завантаження, м^3; $W_{ф.ш.}$ - об'єм фільтруючого шару, м^3.

Площу поверхні зерен завантаження $F_{з.з.}$ можна прийняти величиною постійною. З одного боку цей параметр при кольматації збільшується (зерна як би розбухають через накопичення на поверхні забруднень), а з іншого боку зменшується (відбувається змикання шарів осаду на сусідніх зернах).

З урахуванням залежностей (6) і (14) можемо записати, що

$$F_{пит.з.з.} \approx \frac{1}{(1-n)}, \; r_{з.з.}(z,t) = r_{0з.з.}\left(\frac{n_{0з.з.}}{n_{з.з.}(z,t)}\right)^3. \qquad (15)$$

Аналогічно для пористої перегородки

$$F_{пит.п.п.} = \frac{F_п}{W_п} = \frac{F_п}{W_{ф.ш.}n}. \qquad (16)$$

Площу поверхні пір пористої перегородки також можна прийняти величиною постійною. З одного боку цей параметр при кольматації зменшується (об'єм пір скорочується), а з іншого боку збільшується (за рахунок змикання шарів осаду на сусідніх волокнах збільшується кількість пір, відповідно, утворюється додаткова поверхня). З урахуванням залежностей (12) і (16) можемо записати, що

$$F_{пит.п.п.} \approx \frac{1}{n}, \; r_{п.п.}(z,t) = r_{0п.п.}\left(\frac{n_{0п.п.}}{n_{п.п.}(z,t)}\right)^3. \qquad (17)$$

Таким чином, проведення розрахунків проводиться за допомогою рівнянь та залежностей (1-6), (12), (13), (15), (17). Дана система вирішується числовим методом кінцевих різниць.

Прийняті такі крайові умови:

- початкові умови:

при t = 0 C(z) = $C_ф$ (каламутність фільтрату); S(z) = 0.

Втрати напору на початку фільтроциклу дорівнюють

$$\Delta H_0 = \frac{\Delta p_0}{\rho g} = \frac{Q\mu}{\rho g F}\left(R_{0з.з.} + R_{0п.п.}\right),$$

де $R_{0з.з.}$ - опір шару завантаження до кольматації; $R_{0п.п.}$ - опір пористої перегородки до кольматації;

- граничні умови:

при z = 0 C = C_0, S визначається з рівняння (3):

$$S(0,t) = \frac{b(t)}{a(t)}C_0\left(1 - e^{-a(t)t}\right).$$

За допомогою наведеної вдосконаленої математичної моделі вивчена ефективність застосування пористої перегородки зі змінним розміром пір для доочищення.

Розрахунки проведені для режиму, коли підтримується режим постійної продуктивності Q(t) = const. В якості критерію ефективності вибрана величина, яка представляє собою відношення тривалості роботи між промивками фільтра з дренажною системою, що використовується для доочищення, T_2 до такого ж параметру для фільтра традиційної конструкції T_1.

Для об'єктивності порівняння параметри зернистого завантаження фільтра традиційної конструкції підібрані таким чином, що зниження якості фільтрату нижче допустимого рівня («проскок» забруднень) настає приблизно одночасно з досягненням втратами напору граничних значень у результаті зростання закольматованості завантаження, тобто $T_ф \approx T_н$.

Тривалість роботи фільтра вдосконаленої конструкції T_2 визначалася з урахуванням виконання однієї із зазначених вище умов ($T_2 = T_ф$ або $T_2 = T_н$).

Спочатку розглянуто варіант, при якому розмір пір пористої перегородки змінюється лінійно по її товщині відповідно залежності:

$$\frac{d_{п.п.}(z) - d_{п.п.}^{min}}{d_{п.п.}^{max} - d_{п.п.}^{min}} = 1 - \frac{z}{h_{п.п.}}, \qquad (18)$$

де $d_{п.п.}^{max}$ - максимальний розмір пір, м, який відповідає z = 0; $d_{п.п.}^{min}$ - мінімальний розмір пір, м, який відповідає $z = h_{п.п.}$.

На рис. 1 представлений приклад розрахунку впливу на ефективність доочищення фільтрату пористою перегородкою дренажної системи зміни еквівалентного діаметра зерен завантаження. У якості змінної приймалося співвідношення еквівалентних діаметрів зерен завантаження у фільтрі з доочищенням і звичайної конструкції $d_{2з.з.}/d_{1з.з.}$

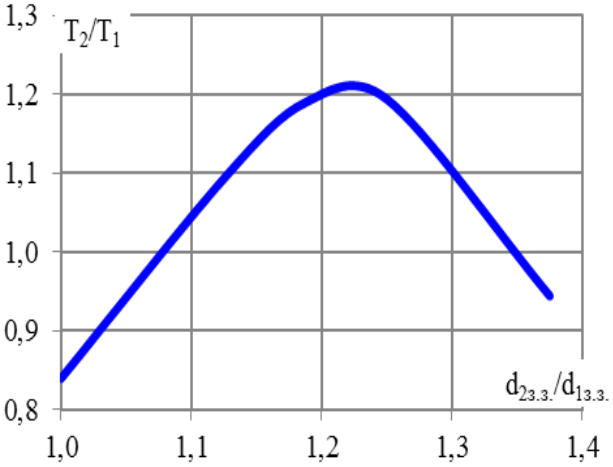

Рис. 1. Залежність параметра T_2/T_1 від еквівалентного діаметра зерен завантаження

Розрахунки проводилися при таких значеннях максимального та мінімального діаметрів пір пористої перегородки, при яких ефект від її застосування був найбільшим.

Результати, представлені на рис. 1, показують, що при доочищенні пористою перегородкою збільшення еквівалентного діаметра зерен зернистого завантаження до певного значення призводить до збільшення тривалості роботи фільтра між промивками. Забруднення більш рівномірно розподіляються по товщині зернистого завантаження, частина з них затримується в пористій перегородці. Подальше збільшення параметра $d_{з.з.}/d_{з.з.}$ призводить до того, що навантаження на пористу перегородку збільшується. При цьому або швидко зростають втрати напору в дренажній системі, або відбувається «проскок» забруднень у фільтрат.

Також було вивчено вплив на тривалість фільтрування параметрів пір пористої перегородки: середнього значення між максимальною і мінімальною величиною $d_{сер.п.п.} = \frac{d_{п.п.}^{max} + d_{п.п.}^{min}}{2}$ та максимального відхилення від середнього значення $\Delta d_{п.п.} = \frac{d_{п.п.}^{max} - d_{п.п.}^{min}}{2}$.

Додатково проведені розрахунки для різних видів залежностей розподілу розмірів пір по товщині пористої перегородки. Крім лінійної залежності (18), розглянуті розподілення, що можна описати за допомогою наступного загального виразу

$$d'(z) = \frac{d_{п.п.}(z) - d_{п.п.}^{min}}{d_{п.п.}^{max} - d_{п.п.}^{min}} = 1 - \left(\frac{z}{h_{п.п.}}\right)^m. \qquad (19)$$

Показник ступеня m приймався рівним 1, 1,6, 2 та 3 (рис. 2).

На рис. 3 представлені приклади розрахунків впливу на ефективність доочищення параметрів m та $\Delta d_{п.п.}/d_{сер.п.п.}$.

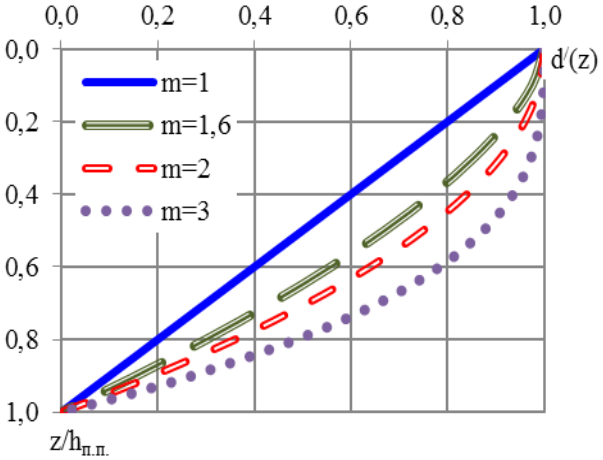

Рис. 2. Розподіл розмірів пір по товщині пористої перегородки (19)

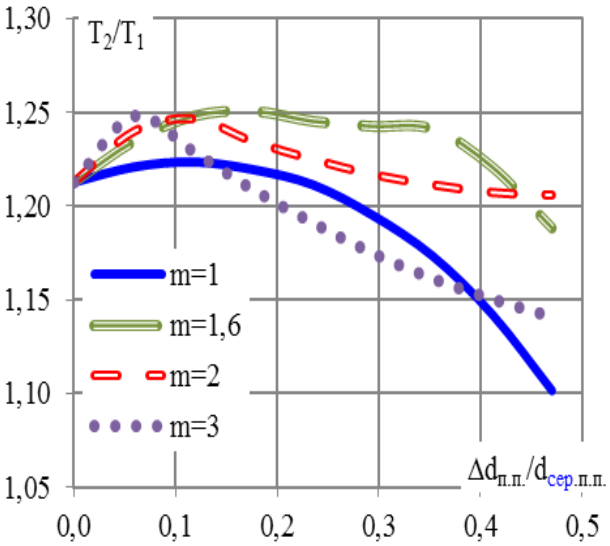

Рис. 3. Залежність параметра T_2/T_1 від розмірів пір ($\Delta d_{п.п.}/d_{сер.п.п.}$) та виду розподілення по товщині перегородки (m)

Коли значення еквівалентного діаметра пір по товщині пористої перегородки розподілені нелінійно, тобто на початковій ділянці переважають пори більшого розміру, ефективність доочищення зростає, причому в широкому діапазоні відхилення від середнього значення. Зі збільшенням показника ступеня m ефективність спостерігається у більш вузькому діапазоні параметра $\Delta d_{п.п.}/d_{сер.п.п.}$.

Це можна пояснити наступним чином. При збільшенні нелінійності залежності (19) забруднення до певного моменту більш рівномірно розподіляються по товщині пористої перегородки. Зростання втрат напору сповільнюється, $T_н \to T_ф$, тривалість роботи фільтра в режимі фільтрування збільшується. При переході через певне значення параметра m кількість пір крупного розміру стає більшою (рис. 2), особливо, коли збільшується максимальне відхилення їх діаметра від середнього значення. При фільтруванні через крупні пори втрати напору ростуть менш інтенсивно, але ці пори гірше затримують частки завісі. Пори меншого діаметру, яких, відповідно, стає менше, не справляються з потоком забруднень, погіршення якості фільтрату відбувається швидше, $T_ф < T_н$, тривалість T_2 зменшується.

Подальше збільшення максимального відхилення призводить до того, що в кінці перегородки розмір пір зменшується. Вони вже створюють значний опір, особливо при кольматації. Втрати напору починають різко зростати, $T_ф \to T_н$, і після того, як $T_н$ стає менше $T_ф$, ефективність перегородки різко падає (рис. 3, m = 1,6).

Висновки і перспективи подальших досліджень

Математичне моделювання процесу послідовного фільтрування води через шар зернистого завантаження та оболонку дренажної системи з пористого волокнистого матеріалу зі змінним розміром пір показало, що застосування пористої перегородки з нелінійним розподілом розмірів пір по її товщині призводить до додаткового збільшення тривалості роботи фільтра між промивками. Удосконалена математична модель дозволяє розрахувати раціональні значення параметрів зернистого завантаження та пористої оболонки, при яких ефект від її застосування для доочищення буде максимальним.

Дана математична модель вимагає перевірки на адекватність шляхом порівняння за допомогою методів математичної статистики розрахункових результатів з даними експериментальних досліджень.

У подальших дослідженнях планується за допомогою математичного моделювання обґрунтувати ефективність очищення паралельним фільтруванням малоконцентрованої суспензії через шар зернистого завантаження та оболонку вертикальних елементів, виконану з пористих волокнистих полімерних матеріалів.

Література

1. *Журба, М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. [Текст]: учеб. пособие / М.Г. Журба, Л.И. Соколов, Ж М. Говорова. – [3-е изд., доп. и перераб]. – Т. 2. Очистка и кондиционирование природных вод. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. – 552 с.*
2. *Теоретические основы очистки воды [Текст] / Н.И. Куликов, А.Я. Найманов, Н.П. Омельченко, В.Н. Чернышев. – Донецк: Изд-во «Ноулидж» (Донецкое отделение), 2009. – 298 с.*
3. *Тугай, А.М. Водопостачання [Текст]: підручник / А.М. Тугай, В.О. Орлов. – К.: Знання, 2009. – 735 с.*
4. *Грабовский, П.А. Промывка водоочистных фильтров / П.А. Грабовский, Г.М. Ларкина, В.И. Прогульный. – Одесса: Оптимум, 2012. – 240 с.*
5. Al-Rawi, S. (2009). Introducing sand filter capping for turbidity removal for potable water treatment plants of Mosul/Iraq. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 1 (1),* 11-19.
6. Odira, P., Ndiba, P. (2007). Performance of crushed coconut shell dual media filter. *Journal of Civil Engineering Research and Practice, 4, 2.* Retrieved from https://www.ajol.info/index.php/jcerp/article/view/29176
7. Gawade, S., Misal S. (2016). Analysis of PVC rapid sand filter. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR), 2(9),* 1370-1373.
8. Mohanty, B. Keval, P., Beran, G., Dhruvit, T. (2017). Design and construction of a modified rapid sand filter for treatment of raw water. *Journal for Research, 3(3),* 9-13.
9. Sabale, R., Mujawar, S. (2014). Improved rapid sand filter for performance enhancement. *International Journal of Science and Research, 3(10),* 1031-1033.
10. Sanyaolu, B. (2010). Comparative performance of a charcoal dual media filter and a conventional rapid sand filter. *Journal of Natural Sciences Engineering and Technology, 9(1),* 137-146.
11. Schevchuk, O. (2006). Mathematical description of multistage filtration. *Filtration and Separation: the 2nd European Conf., Oct. 12-13, 2006: proceeding. Compiegne (France),* 259-265.
12. Bourdon, T., Estes, Z., Hauter, E. (2012). Design and build a multimedia filtration system for sustainable water supply. *Indiana University – Purdue University Fort Wayne,* 41.
13. Adelman, M., Liu, M., Cordero, A., Ayala, J. (2010). Stacked Rapid Sand. Reflection Report. *Cornell University, School of Civil & Environmental Engineering.* Retrieved from https://confluence.cornell.edu/display/AGUACLARA/Stacked+Rapid+Sand+Filtration+Summer+2010+Reflection+Report+1
14. *Паболков, В.В. Удосконалення роботи швидких фільтрів водоочисних споруд при підготовці питної води [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / В.В. Паболков. – Харків: ХНУБА, 2015. – 20 с.*
15. *Бугай, Н.Г. Контактная реагентная очистка воды фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена [Текст] / Н.Г. Бугай, А.И. Кривоног, В.В. Кривоног // Прикладна гідромеханіка. – К., 2007. – Т. 9, №1. – С. 8-22.*
16. *Зубко, О.Л. Ефективні дренажні системи фільтрів [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / О.Л. Зубко. – Харків: ХДТУБА, 1999. – 18 с.*
17. *Эпоян, С. Повышение эффективности работы фильтровальных сооружений при применении дренажных систем из пористых полимерных материалов [Текст]/ С. Эпоян, А. Карагяур, В. Волков, В. Яркин // MOTROL. – Commission of motorization and energetic in agriculture. – Lublin-Rzeszow, 2016. – Vol. 18, № 6. – 102-109.*
18. *Епоян, С.М. Про можливість застосування дренажних систем швидких фільтрів для доочищення [Текст]/ С.М. Епоян, А.С. Карагяур, В.М. Волков // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук.-техн. зб. – К.: КНУБА. – 2016. – Вип. 27 – С. 121-129.*
19. *Жужиков, В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий [Текст]/ В.А. Жужиков. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Химия, 1980. – 400 с.*
20. *Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст]/ Г. Шлихтинг; пер. с нем. Г.А. Вольперт; ред. пер. с нем. Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1974. – 711 с.*

References

1. Zhurba, M., Sokolov, L., Govorova, G. (2010). Water supply. Designing systems and structures: 3 tons. Textbook. allowance. 3rd ed., Ext. and rev. *T.2. Purification and conditioning of natural waters. Moscow: Publishing house of the Association of Construction Universities*, 552.
2. Kulikov, N., Naimanov, A., Omelchenko, N., Chernyshev, V. (2009). Theoretical basis of water purification. *Donetsk: Publishing house "Nouvelage" (Donetsk branch)*, 298.

3. Tugay, A., Orlov, V. (2009). Water supply: textbook. *Kyiv: Knowledge*, 735.
4. Grabovsky, P., Larkina, G., Progulny, V. (2012). Washing of water purification filters. *Odessa: Optimum*, 240.
5. Al-Rawi, S. (2009). Introducing sand filter capping for turbidity removal for potable water treatment plants of Mosul/Iraq. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 1 (1)*, 11-19.
6. Odira, P., Ndiba, P. (2007). Performance of crushed coconut shell dual media filter. *Journal of Civil Engineering Research and Practice, 4, 2.* Retrieved from https://www.ajol.info/index.php/jcerp/article/view/29176
7. Gawade, S., Misal S. (2016). Analysis of PVC rapid sand filter. *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR), 2(9)*, 1370-1373.
8. Mohanty, B. Keval, P., Beran, G., Dhruvit, T. (2017). Design and construction of a modified rapid sand filter for treatment of raw water. *Journal for Research, 3(3)*, 9-13.
9. Sabale, R., Mujawar, S. (2014). Improved rapid sand filter for performance enhancement. *International Journal of Science and Research, 3(10)*, 1031-1033.
10. Sanyaolu, B. (2010). Comparative performance of a charcoal dual media filter and a conventional rapid sand filter. *Journal of Natural Sciences Engineering and Technology, 9(1)*, 137-146.
11. Schevchuk, O. (2006). Mathematical description of multistage filtration. *Filtration and Separation: the 2nd European Conf., Oct. 12-13, 2006: proceeding. Compiegne (France)*, 259-265.
12. Bourdon, T., Estes, Z., Hauter, E. (2012). Design and build a multimedia filtration system for sustainable water supply. *Indiana University – Purdue University Fort Wayne*, 41.
13. Adelman, M., Liu, M., Cordero, A., Ayala, J. (2010). Stacked Rapid Sand. Reflection Report. *Cornell University, School of Civil & Environmental Engineering*. Retrieved from https://confluence.cornell.edu/display/AGUACLARA/Stacked+Rapid+Sand+Filtration+Summer+2010+Reflection+Report+1
14. Pabolkov, V. (2015). Improvement of the work of fast filters of water treatment facilities during preparation of drinking water: *author's abstract. dis. for obtaining sciences. Degree Candidate tech Sciences: special 05.23.04 – Water supply, sewerage. Kharkiv: KhNUCA*, 20.
15. Bugay, N., Krivonog, A., Krivonog, V. (2007). Contact reagent purification of water by filters of fibrous-porous polyethylene. *Applied hydromechanics. Kyiv, 9(1)*, 8-22.
16. Zubko, O. (1999). Efficient drainage systems of filters: author's abstract. *dis. for obtaining sciences. Degree Candidate tech Sciences: special 05.23.04 - Water supply, sewerage. Kharkiv: KhSTUCA*, 18.
17. Epoyan, S, Karahiaur, A, Volkov, V, Yarkin, V (2016). Improving the efficiency of filter structures using drainage systems made of porous polymer materials. *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow, 18(6)*, 102-109.
18. Epoyan, S., Karahiaur, A., Volkov, V. (2016). About the possibility of application of drainage systems of fast filters for extra cleaning. *Problems of water supply, drainage and hydraulics: scientific and technical collection. Kyiv: KNUCA, 27*, 121-129.
19. Zhuzhikov, V. (1980). Filtration. Theory and practice of separation of suspensions 4-th ed., Ext. and rev. *Moscow: Chemistry*, 400.
20. Schlichting, G (1974). The theory of the boundary layer. *Moscow: Nauka*, 711.

Автор: ВОЛКОВ Владлен Миколайович
Заступник генерального директора з експлуатації водопровідного господарства - директор Комплексу «Харківводопостачання»
Комунальне підприємство «Харківводоканал»
E mail – vkg.knuca@ukr.net
ID ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8419-9878

Автор: ЕПОЯН Степан Михайлович
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри водопостачання, каналізації і гідравліки
Харківський національний університет будівництва та архітектури
E mail – vkg.knuca@ukr.net
ID ORCID: http://orcid.org/0000-0003-4551-1309

Автор: КАРАГЯУР Андрій Степанович
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри водопостачання, каналізації і гідравліки
Харківський національний університет будівництва та архітектури
E mail – vkg.knuca@ukr.net
ID ORCID: http://orcid.org/ 0000-0002-8868-3189

Автор: БАБЕНКО Світлана Петрівна
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри водопостачання, каналізації і гідравліки
Харківський національний університет будівництва та архітектури
E mail – vkg.knuca@ukr.net
ID ORCID: http://orcid.org/ 0000-0001-7918-1737

USING POLYMERIC SHELLS OF THE DRAINAGE SYSTEMS OF RAPID FILTERS FOR TERTIARY TREATMENT

V. Volkov[1], S. Epoyan[2], A. Karahiaur[2], S. Babenko[2]

[1]Communal Enterprise «Kharkovvodokanal», Ukraine

[2]Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Ukraine

It is proposed to increase the efficiency of the rapid filters by using for tertiary treatment the drainage systems with a shell of porous fibrous polymeric materials. The rationale for this solution was carried out by means of mathematical modeling. An improved mathematical model of consistent filtration of low-concentration suspension through a layer of granular filtering media and a porous shell is presented. The change in the pore size over to the thickness of the porous membrane is taken into account. Filtration with a gradual pore plugging of the porous membrane is considered. The basis of the mathematical model is made up of equations: filtration, transport of suspended solids by the flow of a filtered fluid, mass transfer. Also the relations that take into account the influence of colmatation and parameters of granular and fibrous media are used. The relation for calculating the resistivity of a porous membrane, taking into account the size of its pores, was derived from the Hagen-Poiseuille equation. This relation is similar to the Kozeny-Karman equation for a granular media.

The influence of the parameters of a granular media and the porous shell on the efficiency of the filtration was studied using a mathematical model. These parameters include the equivalent grain diameter of the granular media, the maximum and minimum pore diameter of the porous membrane, and the distribution type of the pore size over the shell thickness. The use of a porous membrane allows one to increase the equivalent grain diameter of a granular media. As a result, the pollution over the thickness of the granular media is distributed more evenly. Part of the suspended solids is retained in the porous membrane. The variants of linear and non-linear distribution of the equivalent pore diameter over the thickness of the membrane are considered. The calculations were carried out for the filtration mode of constant productivity. The efficiency criterion is the ratio of the duration of operation between washes of a filter with tertiary treatment on the drainage system to the same parameter for a filter of traditional design.

It is shown that the use of a porous membrane with variable pore size allows to additionally increase the efficiency of tertiary treatment. In the membrane of such a design, pollutions, as in the granular layer, are distributed more evenly over its thickness. As a result, the growth of head losses slows down, the duration of the filter operation between washings increases.

Keywords: *granular filtering media, suspended solids, drainage system, porous membrane, polymeric fibrous shells, mathematical model*