

## ДО РОЗРАХУНКУ ТРИВАЛОСТІ ФІЛЬТРОЦИКЛУ ШВИДКОГО ФІЛЬТРА ПРИ ЗМІНІ ШВИДКОСТІ ФІЛЬТРУВАННЯ З ЧАСОМ

*Розглянуто варіант роботи швидкого фільтра при істотній зміні з часом швидкості фільтрування. Представлено диференціальні рівняння, які описують процес руху води в фільтруючому середовищі та інтенсивність видалення забруднень з неї. За результатами отриманого аналітичного розв'язку вихідних рівнянь запропоновано методика інженерного розрахунку технологічних часів і тривалості фільтроциклу. Приведені розрахункові залежності і рівняння ілюструються низкою прикладів з типовими вихідними даними.*

*Ключові слова: фільтрування, суспензія, осад, фільтроцикл.*

**Вступ.** Ефективність роботи водопровідних очисних споруд суттєво впливає як на якість, так і на собівартість очищеної води. Тому питанням очистки води від різного типу забруднень приділяється досить багато уваги. В Україні, як і за кордоном, одними з основних елементів водопровідних очисних споруд є швидкі фільтри, у яких подача води на фільтрування, як правило, здійснюється з постійною витратою. При цьому, в зв'язку з недостатньою проникністю фільтруючого матеріалу, над його поверхнею з часом накопичується певний шар води, і швидкість фільтрування змінюється, що зазвичай має місце на очисних спорудах невеликої продуктивності. В результаті, на вході в завантаження створюється підвищений напір, який з часом постійно збільшується, і здатен суттєво пришвидшити процес фільтрування. З іншого боку, при відкладенні завислих речовин в порах завантаження, яке супроводжується зв'язуванням значної кількості води, зростає його гідравлічний опір, що в решті решт призводить до різкого зниження інтенсивності фільтрувального процесу. Саме прогресуюче замулення фільтруючого матеріалу часто лімітує роботу водоочисних фільтрів.

Дослідженням роботи швидких фільтрів протягом тривалого часу продуктивно займалися багато вчених [1-4]. Проте існуючі методи розрахунку даних споруд є досить приблизними і не враховують багато суттєвих факторів.

Схема роботи швидкого фільтра приведена на рис. 1.

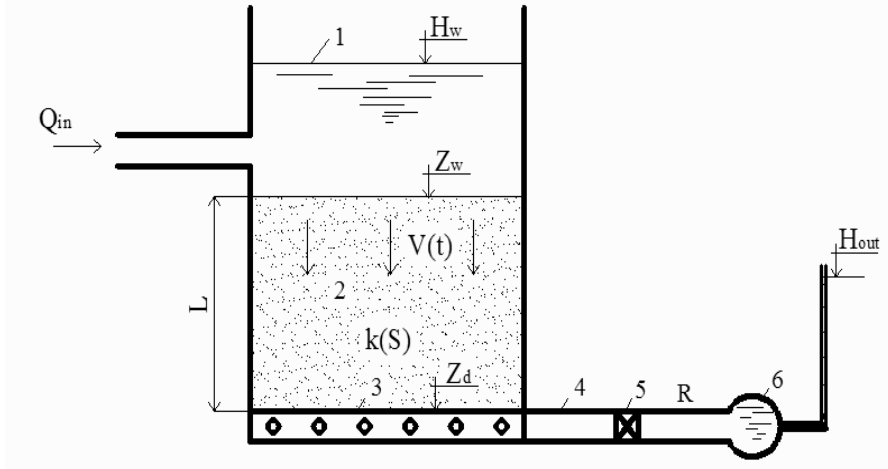


Рис. 1. Схема роботи швидкого фільтра:

1 – рівень води над фільтром; 2 – завантаження фільтра; 3 – збірний трубопровід; 4 – трубопровід; 5 – засувка; 6 – відвідний трубопровід

**Методика розрахунку.** В даній роботі пропонується новий підхід до розробки методики аналітичних розрахунків фільтрувальних споруд. Проведено математичне моделювання освітлення суспензії на водоочисних фільтрах при швидкості фільтрування, яка суттєво змінюється в часі. Вихідна математична модель освітлення суспензії фільтруванням зі змінною швидкістю складається з трьох взаємопов'язаних блоків – освітлювального, фільтраційного і гідравлічного. Освітлювальний блок включає рівняння масо переносу

$$V(t) \frac{\partial C}{\partial z} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

рівняння лінійної кінетики масообміну,

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \alpha(V) \cdot C - \beta(V) \cdot S, \quad (2)$$

граничні та початкові умови

$$z = 0, C = C_0; \quad t = 0, S = 0, \quad (3)$$

де  $C, S$  – об'ємні концентрації завислих та осаджених частинок суспензії;  $\alpha, \beta$  – коефіцієнти швидкостей прилипання завислих та відриву осаджених частинок, які згідно з літературними даними залежать від швидкості фільтрування наступним чином [5]:

$$\alpha = \alpha_V V^l, \quad \beta = \beta_V V^q, \quad (4)$$

тут  $\alpha_V$ ,  $\beta_V$  – відповідні постійні приведені коефіцієнти;  $l$ ,  $q$  – емпіричні константи, які можуть приймати суттєво відмінні значення в залежності від властивостей домішок, механізмів їх доставки до зерен завантаження.

Фільтрація суспензії, яка розділяється в шарі завантаження висотою  $L$  описується рівнянням руху

$$V(t) = -k(S_S) \frac{\partial h}{\partial z}, \quad (5)$$

в якому використовується коефіцієнт фільтрації фільтруючого матеріалу, що замулюється, змінюється за залежністю

$$k = k_0 \left[ 1 - \left( \frac{S_S}{n_0} \right)^{m_1} \right]^{m_2}, \quad (6)$$

співвідношення між вмістом в ньому осаду (зв'язана вода і тверді частинки) і твердих частинок має вигляд

$$S_S = \gamma(S) \cdot S, \quad (7)$$

де  $k$ ,  $k_0$  – поточний і вихідний коефіцієнти фільтрації;  $S_S$  – об'ємна концентрація осаду, який складається з твердих частинок і зв'язаної води;  $h$  – п'єзометричний напір;  $n_0$  – пористість чистого завантаження;  $m_1$ ,  $m_2$  – емпіричні коефіцієнти;  $\gamma$  – емпірична функція, яка характеризує співвідношення між вмістом осаду та твердих частинок у ньому.

Третій блок характеризує особливості поведінки неосвітленої й освітленої води в фільтрувальній установці перед входом в завантаження і після виходу з нього. При цьому враховується, що напір в колекторі фільтрату  $H_{out}$  постійний, а поверхневий шар починає формуватися одразу ( $t = 0$ ). Тоді напір на нижній границі завантаження ( $z = L$ ) з урахуванням втрат напору у відвідних комунікаціях становить

$$z = L, \quad h = H_{out} + R\omega^2 V^2, \quad (8)$$

де  $R$  – опір відвідних комунікацій,  $\omega$  – площа вхідної поверхні завантаження. Динаміка рівня вихідної води розраховується на основі рівняння її балансу

$$\omega \frac{dH_w}{dt} = Q_{in}(t) - \omega \cdot V(t), \quad (9)$$

при початковій умові

$$t = 0, \quad H_w = H_m, \quad (10)$$

де  $Q_{in}$  – витрата води, що надходить на фільтр,  $H_w$  – відмітка рівня води над завантаженням,  $H_m$  – його початкова відмітка, яка визначалась в роботі [6] при аналізі двох початкових стадій роботи фільтрувальної установки.

В результаті наближеного рішення аналітичними методами задачі (1)-(10) отримано формули і рівняння, які дозволяють за допомогою сучасних пакетів програм математичного аналізу Mathcad визначати основні характеристики процесу фільтрування.

На основі отриманого розв'язку розроблено інженерну методика для обґрунтування технологічних часів, а саме, часу захисної дії завантаження  $\bar{t}_p$ , часу досягнення втратами напору в завантаженні гранично допустимого значення  $\bar{t}_v$  і, що найважливіше, тривалості фільтроциклу  $\bar{t}_f$ . Причому, за тривалість фільтроциклу слід приймати менший з даних двох часів. Для цього залучались критерії якості та економічності роботи фільтру, які регламентують підвищення вмісту зависі в фільтраті і зниження продуктивності фільтру.

Оскільки розв'язок був отриманий в параметричній формі, було встановлено зв'язок між відносним параметром задачі  $\bar{V}_c$  (який має зміст середньої за даний період відносної швидкості фільтрування) і часом  $\bar{t}$  у вигляді рівності

$$\left( \sqrt{\left( \int_0^1 \frac{d\zeta}{\bar{k}(\bar{S}(\zeta, \bar{t}; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4\bar{R}\tilde{H}_w(\bar{t}; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{d\zeta}{\bar{k}(\bar{S}(\zeta, \bar{t}; \bar{V}_c))} \right) d\bar{t} = \frac{2\bar{R}\bar{V}_c}{\Psi_h} \bar{t}, \quad (11)$$

$$\text{де } \bar{t} = \frac{Q_{in} t}{\omega n_0 L}, \quad \bar{k} = \frac{k}{k_0}, \quad \bar{R} = \frac{k_0^2 \omega^2 \Delta h_0 R}{L^2}, \quad \Psi_h = \frac{\omega k_0 \Delta h_0}{L Q_{in}}, \quad \tilde{H}_w(\bar{t}; \bar{V}_c), \quad \bar{S}(\zeta, \bar{t}; \bar{V}_c) -$$

функції, які описують зміну приведенного рівня води над завантаженням та об'ємної концентрації осаду з часом [7].

Відносний час захисної дії завантаження пропонується знаходити підбором із системи рівнянь, яка включає вищевказане рівняння (11) (де приймається  $\bar{t} = \bar{t}_p$ ) та рівняння (12):

$$\Psi_h \int_0^{\bar{t}_p} \left[ \sqrt{\left( \int_0^1 \frac{dt}{\bar{k}(\bar{S}(t, \zeta; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4\bar{R}\tilde{H}_w(\zeta; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{dt}{\bar{k}(\bar{S}(t, \zeta; \bar{V}_c))} \right] d\zeta = 2\bar{R}\bar{V}_c \bar{t}_p. \quad (12)$$

Аналогічно пропонується знаходити час досягнення втратами напору в завантаженні гранично допустимого значення  $\bar{t}_v$  із системи рівнянь (11) (де приймається  $\bar{t} = \bar{t}_v$ ) та (13):

$$\sqrt{\left(\int_0^1 \frac{dt}{k(\bar{S}(t, \bar{t}_v; \bar{V}_c))}\right)^2 + 4\bar{R}\bar{H}_w(\bar{t}_v; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{dt}{k(\bar{S}(t, \bar{t}_v; \bar{V}_c))} = 2\psi_h \bar{R} \bar{V}_*, \quad (13)$$

де  $\bar{V}_*$  – мінімально допустиме відносне значення швидкості фільтрування, виходячи з економічних міркувань.

На рис. 2 наведено залежність відносного часу захисної дії завантаження  $\bar{t}_p$  від його адгезійних властивостей  $\bar{\alpha}_v$  при різних відносних швидкостях відриву завсі  $\bar{\beta}_v$ . Дані графіки свідчать про те, що збільшення адгезійних властивостей завантаження призводить до збільшення швидкості відриву раніше затриманих забруднень, а отже і концентрації забруднюючих речовин в фільтраті. В результаті чого відносний час захисної дії завантаження зменшується.

Рис. 3 ілюструє залежність відносного часу зниження швидкості фільтрування до мінімально допустимої  $\bar{t}_v$  від адгезійних властивостей фільтруючого матеріалу  $\bar{\alpha}_v$  при різних відносних швидкостях фільтрування  $\bar{V}_*$ . Дані криві  $\bar{t}_v(\bar{\alpha}_v)$  свідчать про різке зниження часу  $\bar{t}_v$  при збільшенні адгезійних властивостей фільтруючого завантаження. При високих значеннях  $\bar{\alpha}_v$  час ефективної роботи фільтру може значно зменшитись.

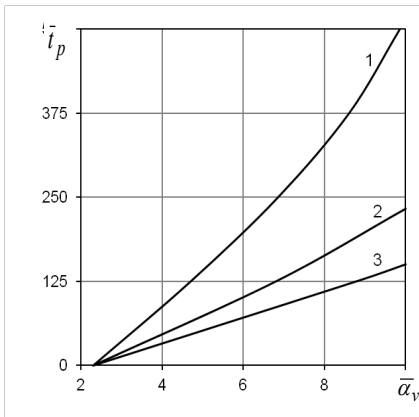


Рис. 2. Залежність  $\bar{t}_p$  від  $\bar{\alpha}_v$  при різних відносних швидкостях відриву завсі: 1 –  $\bar{\beta}_v = 0.01$ , 2 –  $\bar{\beta}_v = 0.02$ , 3 –  $\bar{\beta}_v = 0.03$

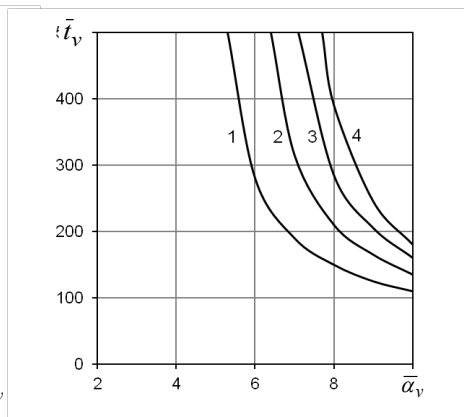


Рис. 3. Залежність  $\bar{t}_v$  від  $\bar{\alpha}_v$  при різних відносних швидкостях фільтрування: 1 –  $\bar{V}_* = 0.9$ , 2 –  $\bar{V}_* = 0.8$ , 3 –  $\bar{V}_* = 0.7$ , 4 –  $\bar{V}_* = 0.6$

Співставлення кривих на рис. 2 і 3 дозволило орієнтовно встановити точки їх перетину і відповідні оптимальні значення тривалості фільтроциклу  $\bar{t}_f$

та відносної інтенсивності прилипання частинок суспензії до частинок завантаження  $\bar{\alpha}_v$ .

На практиці достовірне значення  $\bar{t}_f$  дозволяє своєчасно почати чергову промивку фільтра і тим самим максимально використати його освітлювальний ресурс.

### **Висновки.**

При відсутності регуляторів швидкості фільтрування продуктивність водоочисного фільтра може суттєво змінюватись з часом. Характер подібних змін ускладнюється через накопичення непроясної води над шаром завантаження. Інтенсивний підйом рівня поверхні води і відповідне зростання швидкості фільтрування відбувається переважно на початку фільтроциклу, а надалі внаслідок прогресуючого замулення фільтруючого матеріалу дана швидкість поступово та значно знижується.

Ключовим технологічним параметром є тривалість фільтроциклу, яку слід визначати виходячи з критеріїв якості освітленої води і економічності роботи фільтру.

На основі отриманих залежностей розроблено методику розрахунку часу захисної дії завантаження, досягнення гранично допустимих втрат напору, тривалості фільтроциклу.

За результатами конкретних розрахунків, можна стверджувати, що невдалий вибір матеріалу завантаження може призводити до істотного скорочення часу безперервної роботи фільтру і, як наслідок, перевитрати промивної води.

### **Література**

1. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды. – М.: Стройиздат, 1964. – 155 с.
2. Deb A. Theory of sand filtration // Journal of the sanitary engineering division. – 1969. – Vol. 95. P. 399 – 422.
3. Журба М.Г. Очистка воды на зернистых фильтрах. – Львов: Вища школа, 1980. – 200 с.
4. Орлов В.О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. – Рівне: НУВГП, 2005. – 163 с.
5. Сенявин М.М., Веницианов Е.В., Аюкаев Р.И. О математических моделях и инженерных методах расчета процесса очистки природных вод фильтрованием // Водные ресурсы. – 1977. – №2. – С. 157 – 170.
6. Поляков В.Л., Кравчук А.А. О гидравлике водоочистных безнапорных фильтров на начальных стадиях фильтрования // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2015. – Вип. 25. – С. 223 – 232.

7. Поляков В.Л., Кравчук А.А. Математическое моделирование осветления суспензии фильтрованием с существенно переменной скоростью // Вісник ОДАБА. – 2015. – Вип. 59. – С. 328 – 334.

#### **Аннотация**

В данной работе рассмотрен вариант работы скорого фильтра при существенном изменении со временем скорости фильтрования. Представлены дифференциальные уравнения, которые описывают процесс движения воды в фильтрующей среде и интенсивность удаления загрязнений из нее. По результатам полученного аналитического решения исходных уравнений предложена методика аналитического расчета технологических времен и длительности фильтроцикла. Приведенные расчетные зависимости и уравнения иллюстрируются серией примеров с типичными исходными данными.

Ключевые слова: фильтрование, суспензия, осадок, фильтроцикл.

#### **Abstract**

Variant of rapid filters operation under significant variable velocity over time is considered in this article. Differential equations which describe the process of water movement in a filter medium and the intensity of removing contaminants from it are presented. Based on the results of the analytical solution of the initial equations, a methodology of the analytical calculation of technological times and the duration of the filtration cycle is proposed. The above calculated relations and equations are illustrated by a series of examples with typical initial data.

Keywords: filtration, suspension, sediment, filtration cycle.