

А.С. Карагяур, О.А. Сироватський, А.А. Тітов, С.В. Лукашенко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

ОБГРУНТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОСЛІДОВНОГО ФІЛЬТРУВАННЯ НА ШВИДКИХ ФІЛЬТРАХ

Представлені результати теоретичних досліджень процесу послідовного фільтрування на швидких фільтрах з зернистим завантаженням різної крупності. Дослідження проведено з використанням відомих залежностей теорії фільтрування Д.М. Мінца. Досліджено вплив на ефективність послідовного фільтрування ступеня передочищення та каламутності вихідної води. Показано переваги ступеневого використання: збільшення періоду між промивками, стабільна робота при коливанні каламутності.

Ключові слова: послідовне фільтрування, захисна дія, втрати напору, фільтруюче зернисте завантаження, каламутність.

Постановка проблеми

Підвищення ефективності роботи швидких фільтрів є актуальною задачею, робота над вирішенням якої дозволяє значно скоротити експлуатаційні затрати на станціях підготовки води для господарсько-питних потреб. Ці затрати пов'язані з необхідністю періодичної регенерації фільтруючого зернистого завантаження, в порох якого затримуються завислі речовини. Регенерація проводиться промивкою очищеною водою зі значною інтенсивністю, найчастіше в напрямку зворотному фільтруванню. При цьому витрата промивної води може сягати 10-14% [1] від продуктивності очисних споруд.

Проте складності видалення затриманого осаду не відміняють той факт, що швидкі фільтри з зернистим завантаженням – це ефективні споруди, які при відносно високій швидкості фільтрування (5-12 м/год) [1] забезпечують доведення води до якості питної. На швидких фільтрах результативно видаляється не тільки тонкодисперсна завись, але й такі специфічні забруднення як, наприклад, мікропластик [2] або водорості [3]. Використання поверхні зерен завантаження для іммобілізації спеціальних мікроорганізмів дає можливість видаляти біологічними методами навіть розчинені органічні забруднення [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Скорочення кількості промивної води можливе двома шляхами: удосконалення процесу регенерації та подовження тривалості роботи швидкого фільтру в режимі фільтрування, тобто збільшення часу між промивками. Безпосереднє зменшення об'єму води при промивці можливо в результаті застосування повітряно-водяної [5] пульсуючої або дискретної

[5, 6] промивки, врахування мінливості фізичних властивостей води та завантаження [7]. Важливою задачею при регенерації є також запобігання розшарування зерен фільтруючої засипки [5, 8].

При роботі споруди в режимі фільтрування необхідно забезпечити як можна більш повне використання затримуючої здатності зернистого завантаження. Зміна каламутності вихідної води або неправильно підібрані конструктивні та технологічні параметри фільтру, такі як крупність зерен засипки, її товщина та швидкість фільтрування [9], можуть призвести або до інтенсивної колюматації верхніх шарів завантаження, або до швидкого «прориву» забруднень у фільтрат. Стрімке замулення перших за напрямом фільтрації пластів обумовлює часті відключення фільтру на промивку по причині різкого зростання втрат напору, але при цьому брудоемність нижніх шарів завантаження залишається невикористаною.

Найбільш розповсюдженим прийомом, який дозволяє рівномірно розподілити забруднення по товщині засипки та підвищити брудоемність, є використання мультимедійного (багатошарового) завантаження [10-13]. Головним недоліком такого підходу являється перемішування завантаження та збільшення його розширення при промивці, необхідність застосування матеріалів з різною густиною.

З урахуванням зазначеної проблеми перспективним є застосування багатоступеневого фільтрування, тобто відокремлених секцій або фільтрів з різним завантаженням, через які вода рухається послідовно [14-16]. Таке рішення дає можливість підбирати для кожного фільтра без обмежень засипку з найбільш раціональними параметрами, проводити роздільну промивку по мірі

необхідності, регулювати подачу коагулянта [17] та ін. Але для розробки рекомендацій та обґрунтування удосконалень, які забезпечать максимальну ефективність послідовного фільтрування, необхідні подальші дослідження.

Разом з застосуванням мультимедійного завантаження слід відмітити інші ефективні способи підвищення брудоемності швидких фільтрів, які можуть бути задіяні паралельно. Це, наприклад, використання ефективних коагулюючих добавок [18] або модифікація завантаження такими добавками [19], перепуск частини витрати води у нижні шари завантаження повз закольматованих верхніх [20], додаткове очищення з використанням пористих полімерних оболонки дренажних елементів [21, 22].

Коливання вмісту завислих речовин у вихідній воді, особливо при його підвищенні, призводить до різкого зниження ефективності роботи фільтрувальної споруди, навіть з раціонально підібраними параметрами. Проблемі фільтрування суспензії з високим начальним вмістом завислих речовин приділено увагу, наприклад, в [23], але дослідження удосконалених способів очищення води фільтруванням через зернисте завантаження в умовах зміни каламутності вихідної води залишаються актуальними.

Формулювання мети статті

Метою статті є обґрунтування доцільності застосування послідовної схеми фільтрування та дослідження її ефективності в умовах зміни вмісту завислих речовин у вихідній воді.

Виклад основного матеріалу

Для обґрунтування ефективності схеми послідовного очищення води, яка містить нерозчинні домішки, на швидких фільтрах з різним зернистим завантаженням скористуємося основними залежностями теорії фільтрування малокоцентрованих суспензій Д.М. Мінца [24]. Згідно цієї теорії час захисної дії фільтра, що характеризує тривалість роботи фільтра, при якій забезпечується задана якість очищення води, дорівнює

$$t_s = \frac{1}{K} \frac{b}{a} \left(L - \frac{X_0}{b} \right), \quad (1)$$

де L – товщина зернистого завантаження, м; b та a – кінетичні коефіцієнти: b – коефіцієнт прилипання часток зависі до зерен завантаження, m^{-1} , a – коефіцієнт відриву часток зависі від зерен завантаження, $год^{-1}$; K та X_0 – параметри фільтрування, що залежать від фізико-хімічних

властивостей води та суспензії.

Іншою суттєвою характеристикою роботи швидкого фільтру є час досягнення втратами напорі граничних значень

$$t_n = \frac{b}{a} \frac{L}{\varphi F(A)} \frac{H_{гр} - H_0}{H_0}, \quad (2)$$

де φ – коефіцієнт неоднорідності зерен фільтруючого завантаження; $F(A)$ – функція, яка залежить від граничної насиченості A ; $H_{гр}$ – граничні втрати напорі у закольматованому завантаженні, м; H_0 – втрати напорі у незакольматованому завантаженні (на початку фільтроциклу), м.

В процесі фільтрування суспензії крізь зернисте пористе середовище відбувається прилипання часток зависі до зерен фільтруючого завантаження, отже відбувається зменшення об'єму пор в результаті накопичення затриманого осаду, тобто кольматації. Зменшення пористості середовища призводить до зменшення коефіцієнту фільтрації, а це, в свою чергу, згідно закону Дарсі – до зростання втрат напорі.

Граничними значеннями втрат напорі $H_{гр}$ задаються, виходячи з висотної схеми споруд станції водопідготовки. Згідно [1] орієнтовно втрати напорі на швидких фільтрах слід приймати в діапазоні 3,0-3,5 м.

Оцінити втрати напорі на початку фільтроциклу дозволяє рівняння Козені-Кармана, з якого можна отримати наступну залежність [25]:

$$H_0 = 184L \frac{v}{g} \frac{V}{d^2} \frac{(1-n_0)^2}{n_0^3}, \quad (3)$$

де v – кінематична в'язкість, m^2/c ; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 ; V – швидкість фільтрування, м/год; d – еквівалентний діаметр зерен фільтруючої засипки, м; n_0 – пористість незакольматованого завантаження.

Для розрахунку коефіцієнтів відриву та прилипання Д.М. Мінцем запропоновано залежності

$$a = \alpha \frac{V}{d}; \quad b = \frac{\beta}{V^{0.7} d^{1.7}}, \quad (4)$$

де α , β – коефіцієнти, що враховують сукупний вплив фізичних та фізико-хімічних властивостей води та зависі.

Значення коефіцієнтів α та β можна оцінити з даними, приведеними, наприклад в [25].

Важливою складовою теорії фільтрування Д.М. Мінца є наступні графічні залежності:

– X-T діаграма, де приведено величини коефіцієнтів K та X_0 при різних значеннях якості очищення води, тобто співвідношенні концентрації завислих речовин у очищеній воді до концентрації зависі у воді, яка надходить на фільтр, C_{ex}/C_0 ;

– зв'язок між параметром $F(A)$ та граничною насиченістю A , яка являє собою відношення об'єму пор, що зайнятий осадам, до об'єму пор чистого завантаження.

Указані залежності, які приведені, наприклад, в [26], отримані на основі численних експериментальних даних.

Для визначення граничної насиченості A рекомендуються такі співвідношення [25, 26]:

$$A = \frac{S_{гр}}{n_0 \gamma}, \quad (5)$$

де $S_{гр}$ – гранична концентрація осаду в зернистому завантаженні, мг/л; γ – вміст твердої фази в структурі осаду, мг/л;

$$S_{гр} = C_0 \frac{bV}{a}. \quad (6)$$

Максимальна тривалість роботи фільтру в режимі фільтрування забезпечується, коли час захисної дії t_3 приблизно дорівнює часу досягнення втратами напору граничних значень t_n . Але на практиці для забезпечення надійності якості очищення зазвичай приймають $t_3 = 1,2 \div 1,3 t_n$. Ми в подальших розрахунках зупинимося на такому співвідношенні $t_3 = 1,2 t_n$.

Розрахунки виконували для двох випадків:

1) традиційна схема – уся вода, яка очищується, проходить через один фільтр з одним шаром зернистого завантаження;

2) послідовна схема – вода послідовно проходить через два фільтри, в першому з яких еквівалентний діаметр зерен завантаження дещо збільшено, а в другій споруді – зменшено у порівнянні з традиційним варіантом.

У якості критерію ефективності приймалося співвідношення тривалості роботи у режимі фільтрування фільтрів при організації послідовного фільтрування $t_{1 \rightarrow 2}$ до такого ж параметру при традиційній схемі $t_{1 \uparrow \uparrow 2}$, $K = \frac{t_{1 \rightarrow 2}}{t_{1 \uparrow \uparrow 2}}$.

$$K = \frac{t_{1 \rightarrow 2}}{t_{1 \uparrow \uparrow 2}}.$$

З умови дотримання перепадів відміток води у спорудах, заданих висотною схемою, для двох варіантів приймалося, що граничні втрати напору однакові та дорівнюють $H_{гр} = 3,0$ м. Для другого варіанту $H_{гр} = 3,0$ м – це сумарне значення, розподіл між першим та другим фільтром прийнято

відповідно $H_{гр1} = 1,0$ м та $H_{гр} = 2,0$ м. Товщина фільтруючого завантаження приймалося однаковою, як для фільтру традиційної схеми так і для фільтрів першого та другого ступенів при послідовному фільтруванні, $L = 1,0$ м.

Основна серія розрахунків була виконана при однаковій швидкості фільтрування $V = 7$ м/год.

Для фільтру традиційної схеми при відомих L та V підбиралося значення еквівалентного діаметру зерен фільтруючого завантаження d таким чином, щоб виконувалася умова $t_3 = 1,2 t_n$. В цьому випадку тривалість роботи фільтру у режимі фільтрування буде дорівнювати часу досягнення втратами напору граничних значень $t_{ф1 \uparrow \uparrow 2} = t_{н1 \uparrow \uparrow 2}$.

Для випадку організації послідовної схеми фільтрування хід думок та відповідно порядок розрахунку були наступними:

1) для першого фільтру при вихідній каламутності $C_{en1} = C_0$ та допустимій концентрації зависі у фільтраті, яка приймалося рівною $C_{ex} = 1,5$ мг/л, при відомих L та V підбиралося значення еквівалентного діаметру зерен фільтруючого завантаження d_1 таким чином, щоб виконувалася умова $t_{1,5 \div 1} = 1,2 t_{1,5 \div 1}$;

2) вважалося, що протягом часу $t_{1,5 \div 1}$ перший фільтр забезпечує необхідну якість очищення води, тому немає потреби подавати її на фільтр другого ступеню – вода (фільтрат) відразу надходить до РЧВ;

3) якщо час роботи першого фільтра перевищує $t_{1,5 \div 1}$, то вода відводиться до спільного з іншими фільтрами першого ступеня трубопроводу, де переміщується з водою, яка від них надходить до фільтрів другого ступеню;

4) якість очищення на фільтрі першого ступеня погіршується поступово від $1,5$ мг/л до C_{ex1} , значенням якої ми задаємося, вибираючи із діапазону $1,5 < C_{ex1} < C_0$;

5) умовою відключення першого фільтру на промивку є досягнення концентрації зависі у воді на виході з нього значення C_{ex1} ;

6) при відомих параметрах L , V та d визначаємо час захисної дії першого фільтру $t_{ex \div 1}$, протягом якого забезпечується очищення води до якості не менш ніж C_{ex1} ;

7) фільтри першого ступеню на якийсь даний момент часу працюють на різних фазах фільтроциклу, тому можна вважати, що концентрація зависі у воді в спільному трубопроводі C_{en2} буде приблизно однаковою у часі;

8) визначається середня концентрація домішок після першого ступеня очищення C_{en2} з використанням таких уявлень: в період від $t_{1,5 \div 1}$ до $t_{1,5 \div 1}$ каламутність фільтрату складає $1,5$ мг/л, а в якийсь проміжок часу від $t_{31 i-1}$ до $t_{31 i}$ – середньому значенню між концентраціями на даний момент

часу $C_{ex1}(t_{31i})$ та на попередній $C_{ex1}(t_{31i-1})$

$$C_{en2} = \frac{1}{t_{ex\ 31} - t_{1,5n1}} \left[1,5(t_{1,531} - t_{1,5n1}) + \frac{1}{2} \sum_{t_{1,531}}^{t_{ex\ 31}} (C_{ex1}(t_{31i}) + C_{ex1}(t_{31i-1})) (t_{31i} - t_{31i-1}) \right]; \quad (7)$$

9) для визначення часу захисної дії t_{31i} (для підстановки в залежність (7)), протягом якого забезпечується очищення води до концентрації зависі не менш, ніж $C_{ex1}(t_{31i})$, задаємося значеннями $C_{ex1}(t_{31i})$ в діапазоні від 1,5 мг/л до C_{ex1} з кроком 0,5 мг/л або 1,0 мг/л та розраховуємо t_{31i} (t_{31i} змінюється в діапазоні від $t_{1,531}$ до $t_{ex\ 31}$);

10) для знайденої за формулою (7) концентрації зависі у воді на вході до фільтру другого ступеня C_{en2} та допустимої концентрації зависі у фільтраті $C_{ex2} = 1,5$ мг/л при відомих L та V підбиралося значення еквівалентного діаметру зерен фільтруючого завантаження фільтру другого ступеня d_2 таким чином, щоб виконувалася умова $t_{32} = 1,2t_{n2}$;

11) тривалість роботи фільтрів другого ступеню у режимі фільтрування приймається рівною t_{n2} ;

12) для можливості порівняння ефективності першого та другого варіантів застосування фільтрів за таким критерієм, як тривалість роботи у режимі фільтрування, цей параметр для послідовного фільтрування розраховуємо за формулою

$$t_{1 \rightarrow 2} = t_{ex\ 31} \frac{1}{1 + \frac{t_{n1}}{t_{n2}}}. \quad (8)$$

Формула (8) отримана з наступних міркувань. Між об'ємом промивної води $W_{пр}$ за досить тривалий період часу (наприклад, рік) та кількістю промивок $n_{пр}$, а також тривалістю роботи фільтра у режимі фільтрування $t_{ф}$ і площею фільтрування F , існують наступні співвідношення

$$W_{пр} \sim n_{пр} \sim F \sim \frac{1}{t_{ф}}. \quad (9)$$

При послідовному фільтруванні, крім необхідності промивки фільтру першого ступеня, додаткові затрати пов'язані з промивкою другого фільтру. Відносний об'єм промивної води збільшується на величину $\frac{W_{пр2}}{W_{пр1}}$. Користуючись

залежностями (9), можна зробити висновок, що збільшення об'єму промивної води еквівалентно зменшенню тривалості роботи в режимі

фільтрування та навпаки $\frac{W_{пр2}}{W_{пр1}} = \frac{t_{ex\ 31}}{t_{n2}}$. Таким

чином, затрати на промивку другого фільтру в залежності (8) ми можемо врахувати за допомогою

коефіцієнту $\left(1 + \frac{t_{ex\ 31}}{t_{n2}}\right)^{-1}$.

Аналогічно можемо врахувати ситуацію, коли площа фільтрації одного з фільтрів відхиляється від первісних значень. Протягом часу $t_{1,5n1}$ фільтри першого ступеня забезпечують достатню якість очищення (1,5 мг/л), і вода не подається на фільтри другого ступеня. Фільтри першого та другого ступеня в цей час працюють паралельно, тому необхідна площа фільтрів другого ступеня при однаковій швидкості фільтрування може бути зменшена у порівнянні з площею фільтрів першого ступеню. Це, в свою чергу, еквівалентно збільшенню тривалості періоду фільтрування, відповідно, на величину $\frac{t_{n2}}{t_{ex\ 31}}$. Таким чином,

параметр t_{n2} для підстановки в залежність (9) може бути уточнений

$$t_{n2} = t'_{n2} \left(1 + \frac{t_{n1}}{t_{ex\ 31}}\right), \quad (10)$$

де t'_{n2} – параметр t_{n2} без врахування зменшення площі фільтрування.

За допомогою приведених залежностей та описаного алгоритму було проведено відповідні розрахунки. Задачею першої серії досліджень було виявлення впливу розподілу між фільтрами першого та другого ступенів вкладу в очищення води на ефективність послідовного фільтрування, тобто величини C_{ex1} на параметр K . Результати таких досліджень з врахуванням зменшення площі фільтрів другого ступеня та без врахування приведені на рис. 1. Значення каламутності вихідної води було прийнято $C_0 = 10$ мг/л.

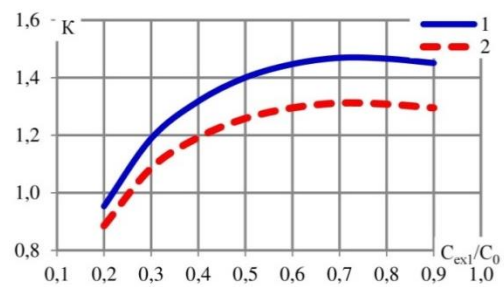


Рис. 1. Залежність $K(C_{ex1}/C_0)$ з врахуванням зменшення площі фільтрів другого ступеня (2) та без врахування (3)

Дані, представлені на рис. 1, свідчать, що послідовна схема використання швидких фільтрів має переваги над традиційною в широкому діапазоні значень якості попереднього очищення C_{ex1}/C_0 . При цьому максимальне значення параметру K для двох розглянутих випадків (рис. 1) забезпечується, якщо C_{ex1}/C_0 лежить в діапазоні 0,6-0,8. Якщо врахувати період, коли перший фільтр забезпечує очищення води до потрібної якості (1,5 мг/л), то параметр ефективності K істотно збільшується (приблизно на 15%).

Застосування послідовної схеми фільтрування передбачає необхідність будівництва додаткових фільтрів, тобто фільтрів другого ступеня очищення, таким чином потребує збільшення площі фільтрації у порівнянні з традиційною схемою. На рис. 2 показано, як необхідна площа фільтрів другого ступеня послідовної схеми F_2 , приведеної до площі фільтрів першого ступеня F_1 , залежить від якості попереднього очищення.

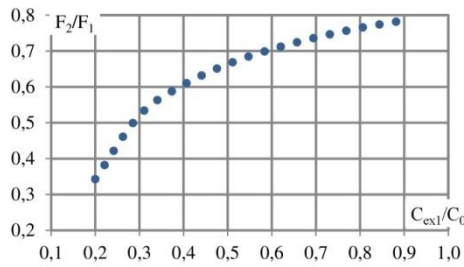


Рис. 2. Залежність необхідної додаткової площі фільтрації (площі фільтрів 2-го ступеня) від якості попереднього очищення

При невеликих співвідношеннях C_{ex1}/C_0 додаткова площа фільтрації не набуває значних розмірів (30-40%) (рис. 2), а в області максимального екстремуму параметра ефективності K складає вже 60-70%. Тому при виборі раціонального значення C_{ex1}/C_0 слід враховувати не максимальне значення параметра K , а співвідношення між скороченням експлуатаційних затрат, пов'язаних з промивкою, та додатковими капітальними затратами на будівництво фільтрів доочищення.

Виникає питання, а якщо просто збільшити площу фільтрування фільтрів традиційної схеми на величину, яка дорівнює площі фільтрів доочищення послідовної схеми, відповідно, цим знизити швидкість фільтрування? Чи не призведе така дія до збільшення тривалості фільтрування у порівнянні зі ступеневою схемою? У зв'язку з цим в [9] відмічено наступне. Залежність $t_n = f(V)$ має максимальний екстремум (рис. 3), який обумовлений протилежним впливом швидкості фільтрування V на граничну концентрацію осаду в зернистому завантаженні S ,

відповідно, на параметр $F(A)$, з одного боку та співвідношення коефіцієнтів прилипання-відриву b/a й початкові втрати напору H_0 з іншого боку. Тому зменшення швидкості фільтрування може призвести не до зростання, а навпаки, до скорочення часу досягнення втратами напору граничних значень t_n (рис. 3).

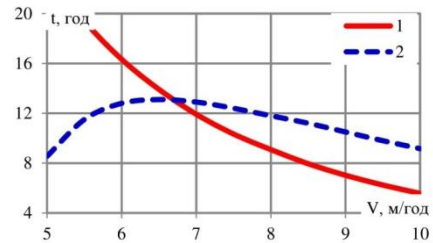


Рис. 3. Залежність часу роботи фільтра у режимі фільтрування від швидкості фільтрування:
 $1 - t_{r1,2} = f(V)$; $2 - t_n = f(V)$

Каламутність вихідної води значно впливає на ефективність роботи швидкого фільтра. Зі збільшенням вмісту завислих речовин у воді, яка надходить на очищення, понад розрахункового часу досягнення втратами напору граничних значень інтенсивно зменшується, набагато швидше, ніж зменшується час захисної дії, відповідно стрімко скорочується час роботи фільтра у режимі фільтрування, кількість промивок зростає.

При зменшенні каламутності вихідної води у порівнянні з розрахунковою, навпаки, час досягнення втратами напору граничних значень інтенсивно зростає та стає набагато більшим часу захисної дії. Якщо на станції водопідготовки контроль роботи фільтра здійснюється шляхом спостереження за напором, то зростає ймовірність «прориву» забруднень у фільтрат, що є недопустимим.

Тому в другій серії розрахунків досліджено вплив на ефективність послідовного фільтрування каламутності вихідної води. Результати представлені на рис. 4.

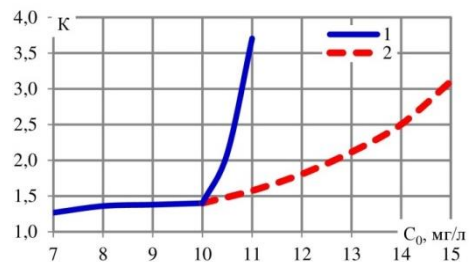


Рис. 4. Вплив каламутності вихідної води на параметр K , коли не змінюється (1) та змінюється (2) швидкість фільтрування при збільшенні каламутності понад розрахункову

Якщо при зміні вихідної каламутності розрахунки для фільтру традиційної схеми або фільтру другого ступеню послідовної схеми показували, що $1,2t_n < t_3$, то час роботи такого фільтру в режимі фільтрування приймався рівним часу досягнення втратами напору граничних значень $t_\phi = t_n$. Якщо навпаки, $1,2t_n > t_3$, то приймалося, що $t_\phi = t_3/1,2$.

Значення розрахункової вихідної каламутності прийнято рівним $C_0 = 10$ мг/л. Під терміном «розрахункова» розуміється таке значення, при якому було підібрані параметри L , V та d з умови $t_3 = 1,2t_n$. При проведенні розрахунків при інших значеннях C_0 параметри L , V та d в одній частині розрахунків (рис. 4, графік 1) залишалися незмінними, а іншій (рис. 4, графік 2), де досліджувалося тільки збільшення вихідної каламутності, – для фільтру, який використовується за традиційною схемою, та фільтру першого ступеня (послідовна схема) коректувалося (збільшувалося) значення швидкості фільтрування V таким чином, що виконувалася умова $t_3 = 1,2t_n$. Для фільтру першого ступеня послідовної схеми ця умова застосовувалася при каламутності на виході з фільтру $C_{ex1} = 1,5$ мг/л, тобто $t_{1,531} = 1,2t_{1,5n1}$. Як саме повинна змінюватися для указаних фільтрів швидкість фільтрування у порівнянні з номінальною V_{10} (підбраною для розрахункової вихідної каламутності $C_0 = 10$ мг/л) при зростанні каламутності вихідної води показано на рис. 5.

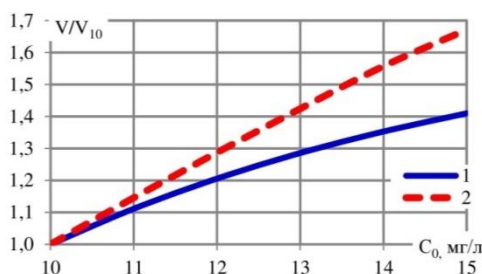


Рис. 5. Залежність швидкості фільтрування, необхідної для виконання умови $t_3 = 1,2t_n$, від каламутності вихідної води: 1 – для фільтру традиційної схеми; 2 – для першого фільтру послідовної схеми

Слід відмітити, що з трьох параметрів L , V та d швидкість фільтрування – єдиний параметр, який відносно нескладно технологічно коректувати при зміні каламутності вихідної води.

Важливим моментом, який вдалося встановити в результаті розрахунків, є те, що дещо компенсувати швидку кольматацию верхніх шарів фільтруючого завантаження, яка відбувається в результаті зростання вихідної каламутності, можливо шляхом збільшення швидкості

фільтрування. Це пояснюється тим, що зростання швидкості призводить згідно залежностям (4) до зменшення коефіцієнту прилипання b та збільшення коефіцієнту відриву a . Зростає кількість зависі, яка з верхніх шарів переноситься потоком рідини в наступні шари, забруднення однорідніше розподіляються по висоті завантаження. Таким чином час досягнення втрат напору граничних значень, який є критичним в даному випадку, дещо збільшується. Зростання швидкості фільтрування призводить також до збільшення об'єму чистої води, який вдається отримати протягом одного фільтроциклу.

Для фільтру традиційної схеми указане необхідне зростання швидкості фільтрування, а отже продуктивності, виявляється більшим ніж для першого фільтру послідовної схеми (рис. 5), але цього недостатньо, щоб нівелювати переваги ступеневого фільтрування (рис. 4).

Крім переваг послідовної схеми, обумовлених скороченням об'ємів промивної води, важливо порівняти, як традиційна чи послідовна схема забезпечують санітарну надійність очищення води фільтруванням. Як сказано вище, при зниженні вихідної каламутності зростає ймовірність «прориву» забруднень у фільтрат, тому має суттєве значення, щоб дотримувалася умова $t_n \leq t_3$. На рис. 6 представлена залежність між співвідношенням t_3/t_n та каламутністю вихідної води, яка отримана в результаті розрахунків для фільтру традиційної схеми та фільтру другого ступеня послідовної схеми. Останній вибраний, тому що саме він здійснює кінцеве очищення води, яка потім надходить у РЧВ.

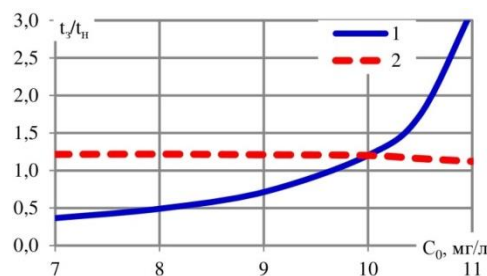


Рис. 6. Залежність $t_3/t_n(C_0)$ для фільтру традиційної схеми (1) та фільтру другого ступеня послідовної схеми (2)

Аналіз результатів розрахунків, представлених на рис. 4 та 6, показує, що послідовна схема має над традиційною переваги не тільки щодо забезпечення більш тривалої роботи фільтру в режимі фільтрування, але й щодо надійності контролю якості очищення. За рахунок більш крупного завантаження у фільтрі першого ступеня зростання втрат напору при збільшенні каламутності вихідної

води відбувається не так різко, як при традиційній схемі. Передочищення забезпечує майже сталу якість води, яка надходить на фільтр другого ступеня, тому для нього умова $t_{\text{н}} \leq t_3$ виконується в широкому діапазоні значень C_0 на відміну від фільтру традиційної схеми (рис. 6).

Висновки і перспективи подальших досліджень

З використанням основних залежностей теорії фільтрування Д.М. Мінца проведено обґрунтування доцільності застосування послідовного фільтрування на швидких фільтрах з різною крупністю зернистого завантаження, що дає можливість збільшити час між промивками на 45-50% у порівнянні з традиційною схемою, коли вся вода пропускається через один фільтр з однорідним завантаженням. Також проведені дослідження показали, що при зміні каламутності вихідної води послідовна схема є більш ефективною та надійною.

В подальших дослідженнях цікавим також буде дослідити вплив інших факторів, таких як товщини зернистого завантаження, величини граничних значень втрат напору та її розподіл між фільтрами першого та другого ступенів.

Література

- ДБН В.2.5 - 74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2013. – 171 с.
- Fajar M. The effect of Filter Media size and loading Rate to filter performance of removing microplastics using rapid sand filter / M. Fajar, E. Sembiring, M. Handajani // *Journal of Engineering and Technological Science*. – 2022. – V.54, №5. –P. 1036-1046. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.5.12>
- Abouzied A.H. The effect of sedimentation by chemical coagulants and the rapid sand filters on algal removal at drinking water treatment plants in Egypt [Електронний ресурс] / A.H. Abouzied, H. A. S. Hassan // *Bulletin of the National Research Centre*. – 2022. – №46. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1186/s42269-022-00754-8>
- Marcantonio C. Organic micropollutant removal in full-scale rapid sand filters used for drinking water treatment in The Netherlands and Belgium [Електронний ресурс] / Camilla Di Marcantonio, Cheryl Bertelkamp, Nikki van Bel, Tessa E. Pronk, Peer H.A. Timmers, Paul van der Wielen, Andrea M. Brunner // *Chemosphere*. – 2020. – V. 260. – Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127630>
- Грабовский П.А. Промывка водоочистных фильтров / П.А. Грабовский, Г.М. Ларкина, В.И. Прогульный. – Одесса: Оптимум, 2012. – 240 с.
- Меддур М.М. Обґрунтування параметрів промивання пінополістирольних фільтрів при контактному знезалізненні води: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / М.М. Меддур. – Рівне, 2014. – 22 с.
- Zielina M. Energy and water savings during backwashing of rapid filter plants [Електронний ресурс] / M. Zielina, W. Dabrowski // *Energies*. – 2021. – 14. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/en14133782>.
- Sabale R. Improved rapid sand filter for performance enhancement / R. Sabale, S. Mujawar // *International Journal of Science and Research*. – 2014. – V.3., Issue 10. – P. 1031-1033.
- Карагяур А.С. Дослідження впливу параметрів швидких фільтрів на ефективність їх роботи / А.С. Карагяур, О.Г. Ісакієва, В.Ю. Сорокіна, А.А. Тімов // *Науковий вісник будівництва*. – Харків: ХНУБА, ХОТБ АБУ, 2020. – № 2(100). – С.230-236. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2020-100-2-230-237>
- Rawat N. Performance optimization of conventional rapid sand filter using brick and wood powder as capping material / N. Rawat, M. Ghalwan // *International Journal of Creative Research Thoughts*. – 2021. – V.9. –P. 1893-1897.
- Tamakhua G. Turbidity removal by rapid sand filter using anthracite coal as capping media / G. Tamakhua, I.M. Amatyab // *Journal of Innovations in Engineering Educations*. – 2021. – V.4, Issue 1. –P. 69-73. <https://doi.org/10.3126/jjee.v4i1.35142>
- Sattorov A.X. Determination of the optimal decision process of high-speed filtration and water supply / A.X. Sattorov, M.I.Zaynabidinova // *Science and innovation International Scientific Journal*. – 2022. – V.1, Issue 7. – P. 378-383. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7295027>
- Srinivasu C.B.N. Design of rapid sand filters by capping of cocoon shell [Електронний ресурс] / C.B.N.Srinivasu, R.Sai Devaraj, K.Sagar Reddy, A.Sai Kiran, Dr. Dumpa Venkateswarlu // *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*. – 2021. – V.7, Issue 7. – Режим доступу: <https://doi.org/10.46501/GIETCE01>
- Кульський Л.А. Повышение задерживающей способности фильтров в двухступенных схемах фильтрования // Л.А. Кульский, Н.В. Ярошевская, Е.А. Шевчук // *Химия и технология воды*. – 1991. – Т. 13. – № 3. – С. 239-241.
- Shevchuk O.O. Hydraulic calculations of the direct multistage filters / O.O. Shevchuk // *Theoretical and Experimental Studies of Interfacial Phenomena and their Technological Applications: the IX Polish- Ukrainian Symposium, Sept. 5-9, 2005: abstracts*. – Sandomierz, Wolska Milanowska (Poland), 2005. – P. 250-253.
- Паболков В.В. Удосконалення роботи швидких фільтрів водоочисних споруд при підготовці питної води: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / В.В. Паболков. – Харків: ХНУБА, 2015. – 20 с.
- Ярошевская Н.В. Обработка воды коагулянтном при ее очистке в процессе двухступенного фильтрования / Н.В. Ярошевская, Е.А. Шевчук, Л.А. Кульский // *Химия и технология воды*. – 1989. – Т. 11. – № 2. – С. 151-155.
- Mota M.H. The effect of alum as filter conditioner on the performance of conventional rapid sand filter / M.H. Mota, P.S. Patil // *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. – 2020. – V.9, Issue 3. –P. 1916-1920. doi: [10.35940/ijeat.C5469.029320](https://doi.org/10.35940/ijeat.C5469.029320)
- Mota M.H. Improving the performance of rapid sand filter using coarser and more uniform media with poly-aluminum chloride as filter aid / M.H. Mota, P.S. Patil, Salkar V.D. // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – 2019. – 10(2). –P. 988-998.
- Карагяур А.С. Математическое моделирование работы скорого фильтра с отводом части потока в нижние слои / А.С. Карагяур, В.Н. Волков // *Науковий вісник будівництва*. – Харків: ХНУБА, ХОТБ АБУ, 2017. – № 4(90). – С. 180-187.
- Epoyan S. Research into the influence of vertical drainage elements on the operational efficiency of rapid filters / S. Epoyan, A. Karahiaur, V. Volkov, S. Babenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technology* – Kharkiv. – 2018. – 1/10 (91) – P. 62-69. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123559>

22. Волков В.М. Використання полімерних оболонок дренажних систем швидких фільтрів для доочищення // В.М. Волков, С.М. Епоян, А.С. Карагяур, С.П. Бабенко // *Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. ХНУМГ імені О.М. Бекетова*. – Харків: ХНУМГ імені О.М. Бекетова, 2017. – Вип. 139. – С. 135-142.

23. Polyakov V. Clarification of aqueous suspensions with a high content of suspended solids in rapid sand filters / V. Polyakov, A. Kravchuk, G. Kochetov, O. Kravchuk // *Chemical Engineering*. – 2019. – №1. –Р. 28-45. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00827>

24. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды / Д. М. Минц. – М.: Стройиздат, 1964. – 155 с.

25. Грабовський П.О. Чисельна реалізація математичної моделі фільтрування / П.О. Грабовський, Н.О. Гурінчик // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки: науково-техн. зб.* – К.: КНУБА, 2006. – Вип.6. – С.4-13.

26. Теоретические основы очистки воды: [учебное пособие] / [Н.И. Куликов, А.Я. Найманов, Н.П. Омельченко, В.Н. Чернышев]. – Донецк: Ноулидж, 2009. – 298 с.

References

1. DBN V.2.5 – 74:2013. Vodopostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia. (2013). K.: DP «Ukrarkhbudinform», 171.

2. Fajar, M., Sembiring, E., Handajani, M. (2022). The effect of Filter Media size and loading Rate to filter performance of removing microplastics using rapid sand filter. *Journal of Engineering and Technological Science*, V.54, №5. 1036-1046. doi: <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.5.12>

3. Abouzieed, A.H., Hassan, H. A. S. (2022). The effect of sedimentation by chemical coagulants and the rapid sand filters on algal removal at drinking water treatment plants in Egypt. *Bulletin of the National Research Centre*, №46. doi: <https://doi.org/10.1186/s42269-022-00754-8>

4. Marcantonio, C., Bertelkamp, C., van Bel, N., Pronk, T.E., Timmers, P.H.A., Van der Wielen, P., Brunner, A.M. (2020). Organic micropollutant removal in full-scale rapid sand filters used for drinking water treatment in The Netherlands and Belgium. *Chemosphere*, V.260. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127630>

5. Hrabovskiy, P.A., Larkyna, H.M., Prohulnyi, V.Y. (2012). *Promyvka vodoochysnykh fyltroyv*. Odessa: Optimum, 240.

6. Meddur, M.M. (2014). Obhruntuvannia parametriv promyvannia pinopolistyrolnykh filtriv pry kontaktnomu znezaliznenni vody: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: 05.23.04 «Vodopostachannia, kanalizatsiia», Rivne, 22.

7. Zielina, M., Dabrowski W. (2021). Energy and water savings during backwashing of rapid filter plants. *Energies*, 14. doi: <https://doi.org/10.3390/en14133782>

8. Sabale, R., Mujawar, S. (2014). Improved rapid sand filter for performance enhancement. *International Journal of Science and Research*, V.3., Issue 10, 1031-1033.

9. Karahiaur, A., Isakiieva, O., Sorokina, V., Titov, A. (2020). Study of the influence of parameters of rapid filters on the efficiency of their operation. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*, № 2(100). 230-236. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2020-100-2-230-237>

10. Rawat, N., Ghalwan, M. (2021). Performance optimization of conventional rapid sand filter using brick and wood powder as capping material. *International Journal of Creative Research Thoughts*, V.9. 1893-1897.

11. Tamakhua, G., Amatayab, I.M. (2021). Turbidity removal by rapid sand filter using anthracite coal as capping media. *Journal of Innovations in Engineering Educations*, V.4, Issue 1, 69-73. doi: <https://doi.org/10.3126/jiee.v4i1.35142>

12. Sattorov, A.X., M.I.Zaynabidinova, M.I, (2022). Determination of the optimal decision process of high-speed filtration and water supply. *Science and innovation International Scientific Journal*, V.1, Issue 7, 378-383. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7295027>

13. Srinivasu, C.B.N., Devaraj, R.S., Reddy, K.S., Kiran, A.S., Dr. Dumpa Venkateswarlu, D.D. (2021). Design of rapid sand filters by capping of coconut shell, *International Journal for Modern Trends in Science and Technology*, V.7, Issue 7. doi: <https://doi.org/10.46501/GIETCE01>

14. Kulskyi, L.A., Yaroshevskaia, N.V., Shevchuk, E.A. (1991). Povyshenye zaderzhivaiushchei sposobnosti fyltroyv v dvukhstupennykh skhemakh fyltrovaniya. *Khymiya y tekhnolohiya vody*, V. 13, № 3, 239-241.

15. Schevchuk, O.O. (2005). Hydraulic calculations of the direct multistage filters. *Theoretical and Experimental Studies of Interfacial Phenomena and their Technological Applications: the IX Polish- Ukrainian Symposium*, Sept. 5-9, 2005: abstracts, Sandomierz, Wolska Milanowska (Poland), 250-253.

16. Pabolkov, V.V. (2015). Udoskonalennia roboty shvydkykh filtriv vodoochysnykh sporud pry pidhotovtsi pytnoi vody: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk: 05.23.04 «Vodopostachannia, kanalizatsiia». – Kharkiv: KhNUBA, 20.

17. Iaroshevskaia, N.V., Shevchuk, E.A., Kulskyi, L.A. (1989). Obrabotka vody koahuliantom pry ee ochystke v protsesse dvukhstupennoho fyltrovaniya. *Khymiya y tekhnolohiya vody*, V. 11, № 2, 151-155.

18. Mota, M.H., Patil, P.S. (2020). The effect of alum as filter conditioner on the performance of conventional rapid sand filter. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, V.9, Issue 3. 1916-1920. doi: [10.35940/ijeat.C5469.029320](https://doi.org/10.35940/ijeat.C5469.029320)

19. Mota, M.H., Patil, P.S., Salkar, V.D. (2019). Improving the performance of rapid sand filter using coarser and more uniform media with poly-aluminum chloride as filter aid. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 10(2), 988-998.

20. Karahiaur, A., Volkov, V. (2017) Mathematical modeling of the operation rapid filter with the bypass of part of the flow to the lower layers, *Scientific Bulletin of Civil Engineering*, № 4(90), 180-187.

21. Epoyan, S., Karahiaur, A., Volkov, V., Babenko, S. (2018). Research into the influence of vertical drainage elements on the operational efficiency of rapid filters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technology*. Kharkiv, 1/10 (91), 62-69. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123559>

22. Volkov, V., Epoyan, S., Karahiaur, A., Babenko, S. (2017). Using polymeric shells of the drainage systems of rapid filters for tertiary treatment. *Municipal Economy of Cities*, 139, 135-142.

23. Polyakov, V., Kravchuk, A., Kochetov, G., Kravchuk, O. (2019). Clarification of aqueous suspensions with a high content of suspended solids in rapid sand filters. *Chemical Engineering*, №1, 28-45. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00827>

24. Mynts, D.M. (1964). Teoretycheskye osnovy tekhnolohyy ochystka vody. M.: Stroiyzdat, 155.

25. Hrabovskiy, P.O., Hurinchyk, N.O. (2006). Chyselna realizatsiia matematychnoi modeli filtruvannia. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliki: naukovotekhn. zb. K.: KNUBA*, Vyp.6, 4-13.

26. Kulykov, N.Y., Naimanov, A.Ia., Omelchenko, N.P., Chernyshev, V.N. (2009). Teoretycheskye osnovy ochystky vody: [uchebnoe posoby]. Donetsk: Noulydzh, 298.

Рецензент: д.т.н., професор, завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи С.Ю. Мартинов, Національний університет водного господарства та природокористування, Україна.

Автор: КАРАГЯУР Андрій Степанович
доктор технічних наук, доцент, професор кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – andrii.karahiaur@kname.edu.ua
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8868-3189>

Автор: СИРОВАТСЬКИЙ Олександр Анатолійович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – oleksandr.syrovatskyi@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1002-8579>

Автор: ТІТОВ Андрій Анатолійович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – andrii.titov@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9330-8829>

Автор: ЛУКАШЕНКО Сергій Вікторович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри водопостачання, водовідведення і очищення вод Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – serhii.lukashenko@kname.edu.ua
ID ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2052-1183>

REASONING OF THE EFFICIENCY OF CONSISTENT FILTRATION ON RAPID FILTERS

A. Karahiaur, O. Syrovatskyi, A. Titov, S. Lukashenko

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

Consistent filtration of water through rapid filters with different filter loadings is a promising way to reduce operating costs at water treatment plants. Operating costs are related with the need to regenerate the granular loading, i.e. restore its retention capacity. Regeneration is carried out by washing with clean water, which removes retained sediment from the loading pores. Washing takes place with a fairly high intensity, which is the reason for significant volumes of washing water. The amount of washing water can be reduced increasing the period between washings. The frequency of washing is also influenced by the turbidity of the initial water. When increase of rapid filters efficiency is reasoning, it is necessary to take into account oscillations in initial turbidity. Purpose is reasoning of the practicability of using a consistent scheme and research of its effectiveness under conditions of change in the content of suspended solid in the initial water. Theoretical studies were carried out on the basis of the known dependencies of the theory of filtering by D.M. Mintz. These dependencies establish a relationship between the time of the protective action and the time when the head loss reaches the limit values with the filtering parameters: filtration rate, equivalent diameter of the granular loading, thickness of the loading layer, quality of the water entering the treatment. The algorithm and principle of comparison of consistent and traditional schemes are described. Graphical dependences of the influence on the efficiency of consistent filtration of pretreatment degree and turbidity of the initial water were obtained. As an efficiency criterion, the ratio for the compared schemes of the longest periods of filter operation between washings is taken. The effectiveness of increasing filtration rate when the initial water quality is worsening is shown. The conducted studies showed the advantages of consistent using of rapid filters: an increase in the period between washings, more stable operation when the turbidity of the initial water changes.

Keywords: consistent filtration, protective action, head losses, filtering granular loading, turbidity.