

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

КРАВЧУК ОЛЕКСАНДР АНДРІЙОВИЧ



УДК 628.16.067

**ФІЛЬТРУВАННЯ РІДИНИ ЗІ ЗМІННОЮ ШВИДКІСТЮ РУХУ
ПОТОКУ**

Спеціальність 05.23.04 – Водопостачання, каналізація

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
ПОЛЯКОВ ВАДИМ ЛЕОНТІЙОВИЧ
провідний науковий співробітник
Інституту гідромеханіки НАН України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ГРАБОВСЬКИЙ ПЕТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ
професор кафедри водопостачання та
водовідведення Одеської державної академії
будівництва і архітектури.

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник

СТОРЧАК ВАЛЕНТИНА АНДРІЇВНА
завідувач кафедри водогосподарських систем та
охорони праці Державного інституту управління
та економіки водних ресурсів.

Захист дисертації відбудеться 14 березня 2018 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.07 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31.

Відгуки на автореферат просимо надсилати у двох примірниках з підписом, завіреним печаткою організації, на адресу: 03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31, КНУБА, Вчена рада Д 26.056.07.

Автореферат розісланий 5 лютого 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.056.07
кандидат технічних наук, професор



Довгалюк В.Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи.

Води природних джерел підготовлюються для господарсько-питних потреб населення та потреб промислових підприємств за різними технологічними схемами з метою приведення їх фізико-хімічних показників у відповідність до вимог споживачів. Одним із основних елементів цих схем є швидкі фільтри з зернистою засипкою, які дають змогу затримувати найменші завислі й колоїдні частинки з води в пористому середовищі

Погіршення якісних показників води природних джерел, підвищення вимог до якості води, що очищається, вимагає інтенсифікації роботи фільтрувальних споруд, підвищення їх продуктивності і розробки надійних методик розрахунку.

В Україні, як і за кордоном, більшість швидких фільтрів, які застосовуються у схемах очистки води для господарсько-побутових та промислових потреб, працюють зі швидкістю, яка істотно змінюється з часом. Проте, на даний час не запропоновано достатньо обґрунтованих і точних математичних моделей, які б описували цей процес. Це пов'язано із складністю вихідних математичних залежностей і аналітичних методів їх розв'язку. Тому в існуючих моделях використано значну кількість, часто не завжди достатньо обґрунтованих, спрощень і припущень. Окрім цього, необхідно відзначити, що в даний час накопичено явно недостатній масив експериментальних даних по вивченню параметрів роботи швидких фільтрів, які працюють при змінній в часі швидкості фільтрування. Практично всі відомі дослідження були присвячені вивченню роботи фільтрувальних споруд з постійною швидкістю фільтрування.

Оскільки робота швидких фільтрів в режимі змінної швидкості фільтрування має ряд суттєвих переваг в порівнянні з режимом постійної швидкості, то експериментальне дослідження відповідних характеристик таких споруд і розробка надійної теоретично обґрунтованої методики їх розрахунку є безумовно актуальним і своєчасним завданням. Вирішення цього питання дасть можливість забезпечити стабільну роботу очисних споруд, на стадії розрахунку надійно визначати товщину шару завантаження і час фільтроциклу, протягом якого при заданій витраті буде забезпечуватись необхідна якість очистки води, що подається споживачам.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано згідно державної програми “Про концепцію розвитку водного господарства України”, вона безпосередньо пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури, які виконувались на замовлення Міністерства освіти і науки України (державний реєстраційний номер №0199u000598, №0199u000661).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є наукове обґрунтування та розробка більш надійних і досконалих методів розрахунку швидких фільтрів, що працюють зі швидкості, яка істотно змінюється з часом,

підвищення ефективності роботи даних споруд і інтенсивності видалення забруднень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз літературних джерел, в яких розглядаються закономірності процесу очистки води на швидких фільтрах з зернистим завантаженням при змінній швидкості фільтрування;
- обґрунтувати фізичну модель процесу вилучення забруднень на швидких фільтрах з зернистою засипкою;
- побудувати математичну модель процесу фільтрування для розглядуваного випадку і запропонувати методи її розв'язку;
- розробити конструкцію системи трубопроводів для подачі і розподілу води у фільтрувальній споруді;
- провести експериментальні дослідження основних характеристик досліджуваних споруд для різних режимів їх роботи;
- розробити інженерну методику розрахунку технологічних і конструктивних параметрів швидких фільтрів, які працюють при змінній швидкості фільтрування.

Об'єкт дослідження – швидкі водоочисні фільтри із зернистим завантаженням.

Предмет дослідження – основні технологічні та конструктивні параметри роботи швидких фільтрів зі швидкістю, яка істотно змінюється з часом, та тривалість фільтроциклу.

Методи дослідження – математичне і фізичне моделювання процесу фільтрування суспензії на швидких фільтрах при змінній з часом швидкості, використання аналітичних і чисельних методів розв'язку розглядуваних задач, перевірка результатів теоретичних досліджень шляхом їх порівняння з отриманими експериментальними даними.

Наукова новизна роботи:

- удосконалено фізичну модель процесу вилучення забруднень на швидких фільтрах з зернистою засипкою, яка враховує вплив змінної з часом швидкості фільтрування;
- обґрунтовано та побудовано математичну модель прояснення суспензії фільтруванням зі змінною швидкістю, яка дозволяє оцінити вплив різних факторів і вихідних характеристик на процес очистки;
- на підставі реалізації запропонованої математичної моделі розроблено аналітичні методи розрахунку основних конструктивних і технологічних параметрів швидких фільтрів із зернистим завантаженням;
- з використанням дослідних даних і спеціальних методик їх обробки визначено основні параметри і коефіцієнти, необхідні для розрахунку даних споруд.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено інженерну методику розрахунку швидких фільтрів, які працюють зі змінною з часом швидкістю та запропоновано рекомендації щодо визначення інтенсивності видалення забруднень очисною спорудою, часу фільтроциклу та товщини

фільтруючого шару зернистого завантаження, що дозволило підвищити ефективність роботи фільтрів, а також збалансувати і регламентувати їх роботу.

Розроблено конструкцію системи трубопроводів для подачі і розподілу води в даній фільтрувальній споруді.

Результати дисертаційної роботи впроваджені при проектуванні швидких фільтрів для очистки води в робочі проекти ТОВ “Юнібуд Енерго сервіс” м. Київ, а також в проекти ТОВ “ПОБІ Вотер Інжиніринг” м. Київ.

Особистий внесок здобувача. Наукові результати, які викладені в дисертації, отримані особисто автором на основі проведення теоретичних і експериментальних досліджень. Здійснено обґрунтування запропонованих фізичної і математичної моделей видалення забруднень фільтруючим зернистим завантаженням і на цій основі розроблено рекомендації по розрахунку основних конструктивних і технологічних параметрів швидких фільтрів. Зокрема, отримано залежності для розрахунку терміну фільтроциклу і оптимальної товщини фільтруючого завантаження. Проведено експериментальні дослідження по визначенню параметрів і коефіцієнтів, які необхідні для виконання розрахунків досліджуваних споруд.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень та окремі розділи дисертації доповідались на науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2015 – 2017 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції “Сучасні проблеми водопостачання і водовідведення. Вода – 2015” (ОДАБА, м. Одеса, 2015); III Міжнародній науково-технічній конференції “Чиста вода. Фундаментальні та промислові аспекти” (НТУУ “КПІ”, м. Київ, 2015); I Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених, аспірантів і студентів “БудМайстерКлас” (КНУБА, м. Київ, 2015); II і III Міжнародних науково-практичних конференціях “Водокористування: технології, споруди, менеджмент” (КНУБА, м. Київ, 2015, 2016); 71-й науково-технічній конференції ХНУБА (м. Харків, 2016); VII Всеукраїнському науковому семінарі “Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур” (ХНУБА, м. Харків, 2016); III Міжнародній науково-практичній конференції “Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія” (КНУБА, м. Київ, 2017).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 12 друкованих праць, в т.ч. 8 у фахових виданнях, 1 у міжнародному фаховому виданні, отримано 1 патент України на винахід.

Структура і об’єм дисертації. Дисертація складається із вступу, п’яти розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел з 158 найменувань і додатків. Робота викладена на 168 сторінках, містить 46 рисунків, 1 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наводиться обґрунтування актуальності теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, відображено наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів, відмічається особистий внесок автора роботи, відомості про апробацію досліджень та публікації, структуру і обсяг дисертації.

У першому розділі виконано аналітичний огляд стану проблем моделювання процесів фільтрування через зернисте завантаження. Висвітлено основні математичні моделі, які описують даний процес. Проаналізовано диференційні рівняння, які описують динаміку процесу видалення забруднень зернистим матеріалом та рух рідини у пористому зернистому середовищі, визначено розрахункові режими роботи фільтра.

На основі робіт Д.Н. Мінца, Ю.М. Шехтмана, Є.В. Венеціанова, М.Н. Сисоева, В.А. Клячко, Е.Ф. Кургаєва, Л.А. Кульського, В.П. Криштула, О.Я. Олійника, А.Я. Аюкаєва, П.А. Грабовського, В.Л. Полякова, А.М. Фоміних, М.Г. Журби, С.М. Епоєна, Н.Е. Hudson, D.A. Cornwel, K.J. Ives, J. Kozeny та ін. було виконано аналіз основних рівнянь та моделей, які описують рух рідини в пористому зернистому середовищі. Літературний аналіз показав, що на сьогоднішній день існує певна кількість моделей, які описують процес фільтрування, в тому числі зі змінною з часом швидкістю. Проте, більшість існуючих розв'язків були отримані чисельними методами, і відносились до випадку постійного перепаду напору в шарі завантаження, що не завжди відповідає практиці фільтрування.

На основі виконаного аналізу даних теоретичних і експериментальних досліджень вітчизняних і зарубіжних вчених показано необхідність вдосконалення існуючих моделей фільтрування та методик інженерного розрахунку основних параметрів процесу фільтрування зі змінною з часом швидкістю.

Важливим питанням при експлуатації і проектуванні фільтрувальних споруд є визначення тривалості фільтроциклу та досягнення граничних втрат напору, а також товщини завантаження для розрахунку яких відсутні надійні залежності.

У другому розділі представлена математична модель фільтрування води на швидких фільтрах із зернистим завантаженням, яка застосовується для випадку змінної з часом швидкості фільтрування.

З початку чергового фільтроциклу над поверхнею завантаження з'являється рівень води (рис.1), який потім протягом усього періоду фільтрування поступово, причому нерівномірно в часі, підвищується. Внаслідок цього напір на вході в завантаження зростає. Подібна ситуація є важливим наслідком прогресуючого замулення фільтруючого матеріалу, що з часом неминуче призводить до зменшення швидкості фільтрування.

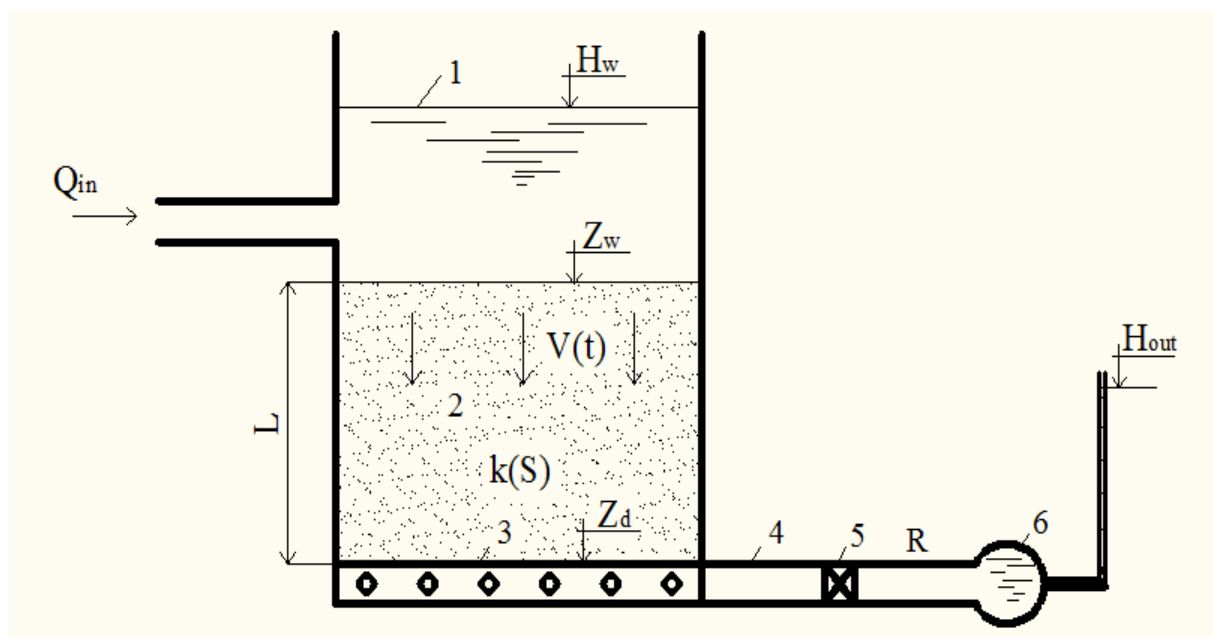


Рис. 1. Схема роботи швидкого фільтра:

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

Аналіз роботи швидких фільтрів дає підстави для виділення в процесі прояснення суспензії трьох стадій – двох короточасних початкових і основної. Для першої стадії характерно утворення і переміщення вниз по завантаженню фронту насичення, який розділяє це завантаження на ділянки з заповненими і незаповненими сирогою водою порами. Друга стадія характеризується інтенсивним накопиченням сирогою води вище поверхні фільтруючого матеріалу через недостатню пропускну здатність поки що фактично незамуленого пористого середовища. Протягом перших двох стадій фільтр фактично тільки підготовлюється до основної третьої стадії прояснення суспензії. Через їх коротку тривалість вони суттєво не впливають на процес очистки рідини на швидких фільтрах. В подальшому у роботі буде розглядатися тільки третя, основна стадія роботи фільтра.

Запропонована математична модель прояснення суспензії фільтруванням зі змінною швидкістю складається з трьох взаємопов'язаних блоків.

Прояснювальний блок включає рівняння масопереносу

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

рівняння лінійної кінетики масообміну

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

а також, граничну та початкову умови

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

де C, S – об’ємні концентрації завислих та осаджених частинок суспензії; α, β – коефіцієнти швидкостей прилипання завислих та відриву затриманих частинок, які згідно з літературними даними, залежать від швидкості фільтрування наступним чином

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

тут α_V, β_V – відповідні приведені (постійні) коефіцієнти; l, q – емпіричні константи, які можуть приймати суттєво відмінні значення в залежності від властивостей домішок і механізмів їх доставки до зерен завантаження.

Другий, фільтраційний блок враховує закономірності фільтрування суспензії, яке відбувається в шарі завантаження висотою L і описується рівнянням руху

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

в якому зміну коефіцієнта фільтрації при замуленні визначають за формулою

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

При цьому співвідношення між вмістом в осаді твердих частинок і зв’язаної води складає

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

де k, k_0 – поточний і початковий коефіцієнти фільтрації; S_S – об’ємна концентрація осаду, який складається з твердих частинок і зв’язаної води; h – п’езометричний напір; n_0 – пористість чистого завантаження; m_1, m_2 – емпіричні коефіцієнти; γ – емпірична функція, яка характеризує співвідношення між вмістом осаду та твердих частинок в ньому.

Третій блок враховує особливості поведінки непроясненої і проясненої води у фільтрувальній установці перед входом в завантаження і після виходу з нього. При цьому вважається, що напір в колекторі фільтрату H_{out} є постійним, а поверхневий шар починає формуватися одразу ($t = 0$). Тоді напір на нижній границі завантаження ($z = L$), з урахуванням втрат напору у відвідних комунікаціях, буде

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

де R – опір відвідних комунікацій; ω – площа перерізу відвідного каналу.

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

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

тут Q_{in} – витрата води, що надходить на фільтр, H_w – відмітка рівня води над завантаженням, H_m – його початкова відмітка.

Розв'язання математичної задачі (1–10) здійснюється після попереднього введення до розгляду нових безрозмірних змінних і параметру

$$\bar{V}_c(T) = \frac{1}{T} \int_0^T \bar{V}(\bar{t}) d\bar{t}, \quad (11)$$

який можна трактувати як середнє за розрахунковий період гідравлічне навантаження (середню за розрахунковий період відносну швидкість фільтрування). Процедура осереднення розповсюджувалась і на коефіцієнти $\bar{\alpha}(\bar{V})$ і $\bar{\beta}(\bar{V})$.

Розв'язок рівнянь прояснювального блоку, який включає рівняння (1), (2), одержано операційним методом із застосуванням перетворення Лапласа по змінній \bar{t} . В результаті отримані наступні функції-оригінали, відповідно, безрозмірні концентрації завислих і осаджених частинок дисперсного забруднення

$$\begin{aligned} \bar{C}(\bar{z}, \bar{t}; \bar{V}_c) = e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \bar{z}} [e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^q \bar{t}} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-1} \bar{z} \bar{t}}) + \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \int_0^{\bar{V}_c \bar{t}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \eta} \cdot \\ \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{z} \eta}) d\eta], \end{aligned} \quad (12)$$

$$\bar{S}(\bar{z}, \bar{t}; \bar{V}_c) = \bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \cdot e^{-\bar{\alpha}_v \bar{V}_c^{l-1} \bar{z}} \int_0^{\bar{V}_c \bar{t}} e^{-\bar{\beta}_v \bar{V}_c^{q-1} \eta} \cdot I_0(2\sqrt{\bar{\alpha}_v \bar{\beta}_v \bar{V}_c^{l+q-2} \bar{z} \eta}) d\eta, \quad (13)$$

де символ I_0 означає функцію Бесселя уявного аргументу першого роду нульового порядку.

Для отримання конкретних значень вказаних концентрацій попередньо слід використати рівняння, яке неявним чином встановлює зв'язок між відносним параметром \bar{V}_c та відносним часом \bar{t} і має вигляд

$$2\bar{R}\bar{V}_c\bar{t} = \int_0^{\bar{t}} \left[\sqrt{\left(\int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4\bar{R}\tilde{H}_w(\zeta; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{d\eta}{\bar{k}(\bar{S}(\eta, \zeta; \bar{V}_c))} \right] d\zeta. \quad (14)$$

Вираз для функції рівня непроясненої води вище завантаження:

$$\tilde{H}_w(\bar{t}; \bar{V}_c) = \tilde{H}_m + \frac{1 - \bar{V}_c \bar{t}}{\psi_V}. \quad (15)$$

Для розрахунку характеру зміни відносної швидкості фільтрування з часом рекомендується залежність

$$\bar{V}(\bar{t}; \bar{V}_c) = \frac{1}{2\bar{R}} \left(\sqrt{\left(\int_0^1 \frac{d\zeta}{\bar{k}(\bar{S}(\zeta, \bar{t}; \bar{V}_c))} \right)^2 + 4\bar{R}\tilde{H}_w(\bar{t}; \bar{V}_c)} - \int_0^1 \frac{d\zeta}{\bar{k}(\bar{S}(\zeta, \bar{t}; \bar{V}_c))} \right). \quad (16)$$

Втрати напору у фільтруючому завантаженні при цьому можна знаходити за формулою

$$\tilde{h}(\bar{z}, \bar{t}; \bar{V}_c) = \bar{V}(\bar{t}; \bar{V}_c) \int_{\bar{z}}^1 \frac{d\zeta}{\bar{k}(\bar{S}(\zeta, \bar{t}; \bar{V}_c))}. \quad (17)$$

Фільтр протягом часу своєї роботи повинен одночасно забезпечувати виконання трьох умов – високу якість очистки води, задану продуктивність і висоту підйому рівня води до максимально допустимого. Час, протягом якого забезпечується перша умова, називається часом захисної дії завантаження фільтра t_P , друга умова – часом ефективної роботи фільтра t_V , третя – часом допустимого підйому рівня води t_H .

Зазвичай тривалість фільтроциклу t_f можна ототожнювати з найменшим з цих трьох характерних часів. З формальної точки зору це означає, що

$$t_f = \min(t_P, t_V, t_H). \quad (18)$$

Із залежності (18) витікає, що для знаходження t_f необхідно розрахувати і співставити три вказаних характерних терміни. На основі виконаного в даній роботі аналізу нами запропоновані аналітичні формули для розрахунку тривалості фільтроциклу.

Відносний час захисної дії завантаження \bar{t}_P , виходячи з вимоги не перевищувати нормативної концентрації зависі C_* на виході з фільтра, пропонується знаходити підбором з системи двох рівнянь (12) і (14), в яких \bar{t} вважається рівним \bar{t}_P . Відносний час \bar{t}_V зниження швидкості фільтрування до мінімально допустимої V_* розраховується з використанням системи, яка також містить залежність (14) і рівняння (16). При цьому вважається, що $\bar{t} = \bar{t}_V$. Відносний час \bar{t}_H досягнення максимального рівня води над завантаженням H_{W*} визначається з використанням вихідного рівняння (14) і залежності (15) при $\bar{t} = \bar{t}_H$. Після розрахунку \bar{t}_P , \bar{t}_V , \bar{t}_H за час фільтроциклу \bar{t}_f приймається менше з трьох значень.

Одним з найважливіших конструктивних елементів водоочисних фільтрів є висота шару завантаження L . Її невдалий вибір може призводити до значного скорочення часу їх безперервної роботи. В основі запропонованої методики розрахунку висоти L лежать отримані і трансформовані нами рівняння (12), (14), (16), які призначені для визначення технологічних часів. Шукану величину L доцільно розраховувати за умови забезпечення максимальної тривалості фільтроциклу t_f .

У третьому розділі описано методику проведення експериментальних досліджень та математичної обробки їх результатів. Здійснено планування експерименту. Дослідження фільтрування води проводились на експериментальній установці, яка була запроєктована із використанням критеріїв подібності та змонтована в лабораторії кафедри водопостачання та водовідведення Київського національного університету будівництва і архітектури. Схема експериментальної установки представлена на рис. 2.

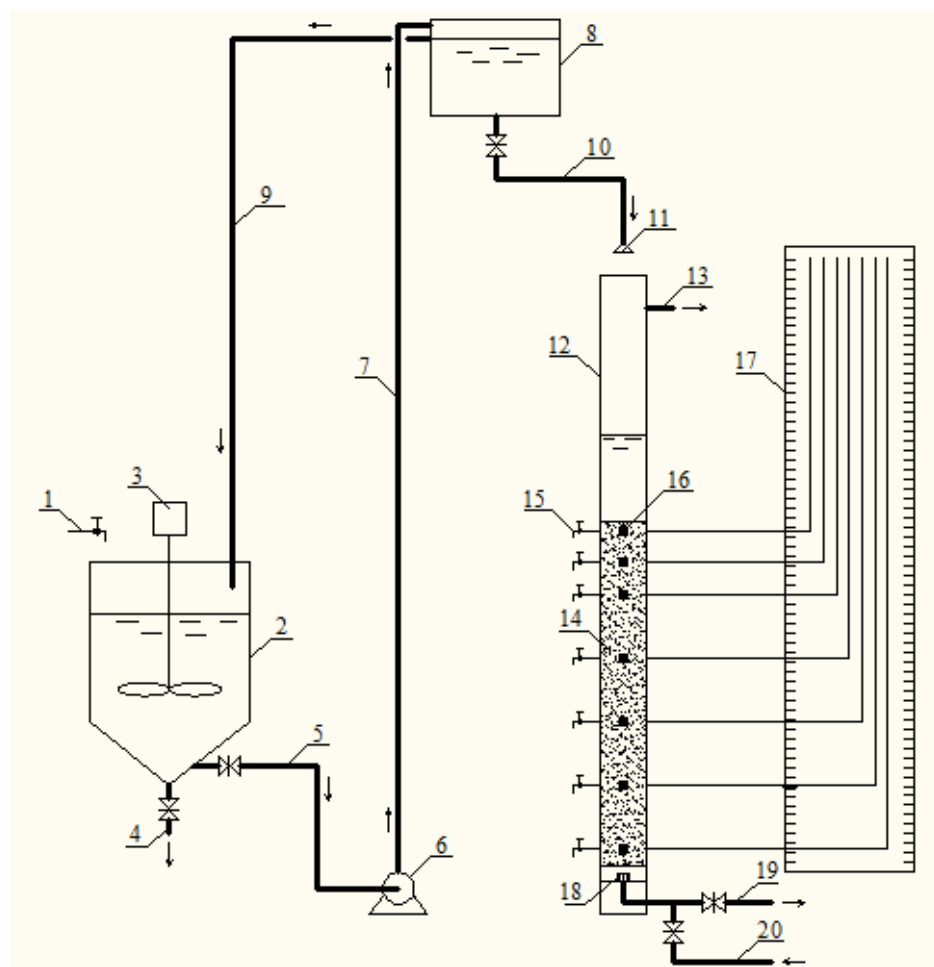


Рис. 2. Схема експериментальної установки:

- 1 – подача води з водопровідної мережі; 2 – бак для приготування суспензії;
 3 – механічна мішалка; 4 – випуск в каналізацію; 5 – трубопровід подачі суспензії до насосу; 6 – насос; 7 – напірний трубопровід подачі суспензії до витратного баку; 8 – витратний бак; 9 – переливний трубопровід;
 10 – трубопровід подачі суспензії на фільтр; 11 – розподільчий оголовок;
 12 – фільтрувальна установка; 13 – переливний трубопровід; 14 – фільтруюче завантаження; 15 – крани для відбору проб суспензії; 16 – місце для відбору проб завантаження; 17 – щит п'єзометрів; 18 – дренажний ковпачок;
 19 – трубопровід відводу очищеної води; 20 – трубопровід подачі води на промивку

В якості модельних забруднень, які видалялись з води фільтруванням, прийнято молоту спондилову глину. Фільтрування відбувалось зверху вниз. Фільтрувальна колона була виготовлена з труби ПВХ Ø150 висотою 2 м. Верх залишався відкритим, низ герметично закритим. Висота шару завантаження піску (14) становила 1,0 м. На трубі влаштовано 7 створів (1, 2, 3 – на відстані 0,1 м, 4, 5, 6, 7 – через 0,2 м), в яких відбувався відбір води, що очищала (15), і проб піску (16). В цих же створах було підключено п'єзометричні трубки (17).

Перед початком вимірювань були виконані дослідження параметрів фільтруючого завантаження. Його щільність в насипному стані становила 1412 кг/м^3 , у щільному тілі – 2650 кг/м^3 , пористість $n_0 = 0,47$, еквівалентний

діаметр частинок завантаження $d_{екв} = 1,15$ мм, їх коефіцієнт форми $k_{\phi} = 1,19$, щільність частинок забруднень із спондилової глини – 1400 кг/м³.

При проведенні експериментальних досліджень вимірювались витрата фільтрованої води, втрати напору у фільтруючому завантаженні і висота шару води над ним.

Окрім визначення гідравлічних характеристик потоку, в ході експерименту в усіх створах і на виході з установки за допомогою спеціальних кранів (15) відбирались проби суспензії, що очищалась, об'ємом $10 - 20$ мл, в яких за допомогою фотоколориметру КФК-2 проводилось вимірювання концентрації завислих речовин.

Важливим етапом при проведенні дослідів було визначення концентрації забруднень, які були затримані у піщаному завантаженні, при роботі фільтрувальної установки. Для цього за допомогою спеціальних патрубків (16) паралельно з пробями води відбирались проби фільтруючого піску об'ємом 5 см³. Забір проб фільтрованої води та піску здійснювався кожену годину. При цьому фіксувалась динаміка зміни їх показників протягом часу. Також проводилась окрема серія дослідів для визначення відношення концентрації осаду та твердих частинок у ньому (γ). Було оцінено величину і вплив різного роду похибок, що виникають при проведенні експериментів, на дійсні значення виміряних величин. Прийнята методика перевірки отриманих експериментальних даних на відтворюваність за критерієм Кохрена і на адекватність за критерієм Фішера.

У четвертому розділі представлено результати експериментальних досліджень процесу фільтрування суспензії через зернисте завантаження, а також здійснено аналіз отриманих даних.

Проведено вимірювання втрат напору в завантаженні фільтра як при пропуску чистої води, так і при наявності певної концентрації забруднень в ній. З'ясовано, що підвищення швидкості фільтрування призводить до суттєвого збільшення втрат напору. Також очевидне підвищення втрат напору з часом. Причому, зафіксовано їх лінійне зростання в усіх досліджуваних випадках, що свідчить про ламінарний режим руху рідини через зернисте завантаження фільтра і відсутність впливу сил інерції. Відмічається, що, збільшення початкової концентрації забруднень в 2 рази, призводить до збільшення втрат напору приблизно в 1,7 рази протягом всього розрахункового часу фільтрування.

Аналіз отриманих даних підтверджує відомий факт, що протягом всього періоду фільтрування основні втрати напору мають місце у верхніх за напрямком руху води шарах завантаження. В наступних за товщиною завантаження створах втрати напору різко зменшуються. Графік, що підтверджує цей висновок, приведено на рис. 3.

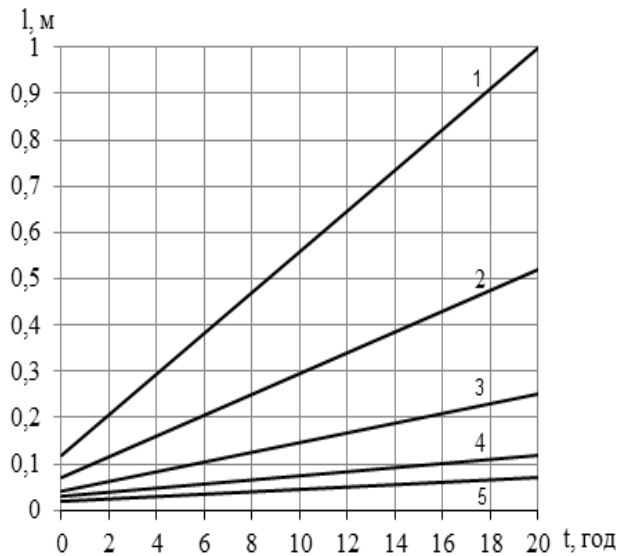


Рис. 3. Визначення втрат напору на різних висотах фільтра:
1 – 100% Δh ; 2 – 90% Δh ; 3 – 80% Δh ;
4 – 70% Δh ; 5 – 50% Δh

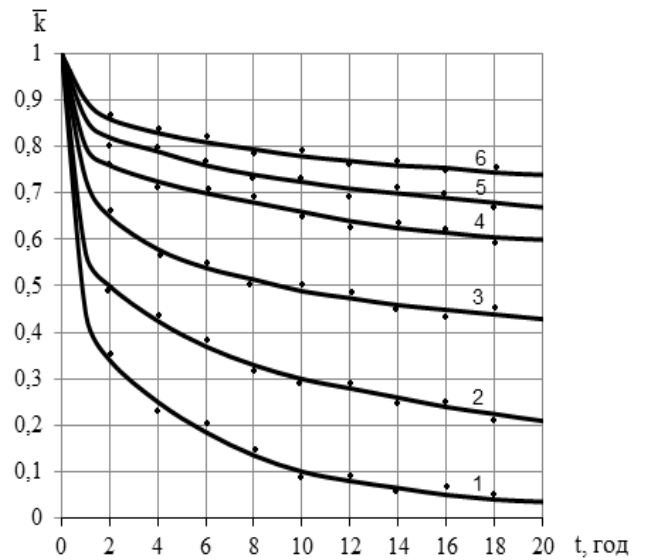


Рис. 4. Зміна відносного коефіцієнта фільтрації різних шарів завантаження протягом часу: 1. Між створами 1-2; 2. Між створами 2-3; 3. --- “ --- 3-4; 4. --- ” --- 4-5; 5. --- ” --- 5-6; 6. ---”--- 6-7

З нього слідує, що через 20 годин роботи 100% втрат напору мають місце на всій глибині (висоті) фільтра ($L = 1$ м), 80% втрат напору будуть до глибини $z = 0,25$ м, 50% – до глибини $z = 0,07$ м. Очевидно, що збільшення втрат напору в тілі фільтра при русі рідини через його зернисте завантаження, викликає збільшення гідравлічного похилу і підвищення висоти шару води над ним.

Важливим узагальненим параметром, яким комплексно враховують особливості гідравлічних і фільтраційних характеристик зернистого завантаження, може служити коефіцієнт фільтрації k . При проведенні експериментів визначався також характер зміни коефіцієнта фільтрації з часом і за висотою (довжиною) завантаження при різних швидкостях фільтрування і початкових концентраціях забруднень. Як приклад, на рис. 4 приведено результати експериментальних досліджень по визначенню змінного за висотою відносного коефіцієнта фільтрації ($\bar{k} = k/k_0$) для випадку початкової концентрації забруднень $C_0 = 50$ мг/л і швидкості фільтрування $V = 6.93$ м/год. Як слідує з рис. 4, найбільш інтенсивне зменшення коефіцієнта фільтрації за висотою завантаження відбувається в першому за рухом рідини створі. Чим далі розташований створ від початкового, тим ця зміна зменшується і стає мінімальною в останньому нижньому шарі. У всіх створах найбільш інтенсивне зменшення відповідного відносного коефіцієнта фільтрації має місце в початкові періоди роботи фільтра. Протягом часу ця інтенсивність знижується.

Наступним важливим етапом при проведенні досліджень були вимірювання закономірностей зміни концентрації забруднень у фільтрованій воді з часом як в різних перерізах за висотою фільтра, так і в його кінцевому перерізі. При цьому досліди проводились при різних швидкостях

фільтрування. Окремі, характерні результати вимірювань зміни відносної концентрації забруднень ($\bar{C} = C/C_0$) за висотою фільтра ($\bar{z} = z/L$) при концентрації в початковому перерізі $C_0 = 50$ мг/л і швидкості фільтрування $V = 4,08$ м/год, в залежності від часу роботи установки, приведені на рис. 5.

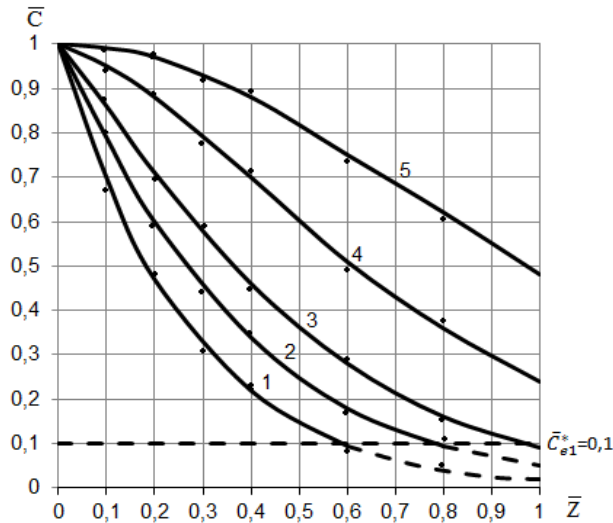


Рис. 5. Зміна концентрації за висотою фільтра при: 1. $t = 3$ год; 2. $t = 9$ год; 3. $t = 15$ год; 4. $t = 30$ год; 5. $t = 50$ год

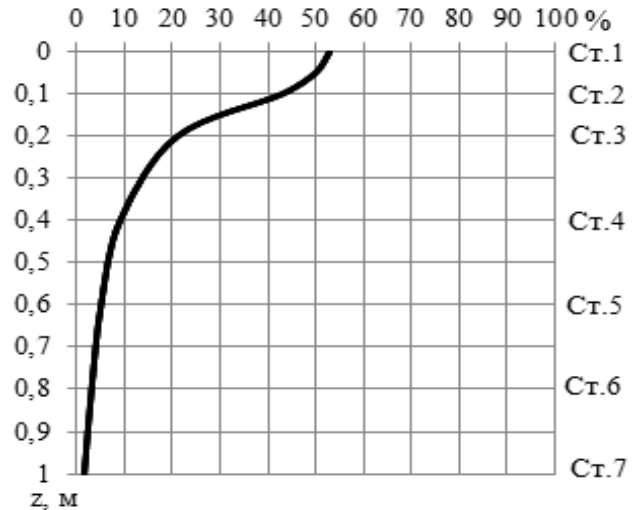


Рис. 6. Розподіл маси забруднень за висотою фільтра через 20 годин роботи

З графіка слідує, що максимальний ступінь очистки має місце в початкових перерізах фільтра. З глибиною завантаження інтенсивність очистки різко зменшується і має мінімальне значення в кінцевих перерізах. В початкові періоди роботи фільтра максимальне значення інтенсивності має місце на ділянці завантаження до 0,3 м. Протягом певного часу інтенсивність очистки на початкових ділянках фільтра зменшується і більш активно починають працювати шари в глибині завантаження. В кінцеві періоди роботи початкові ділянки фільтруючого матеріалу практично виключаються з роботи. За результатами вимірювань також можна зробити висновок, що збільшення швидкості фільтрування, призводить до зменшення терміну фільтроциклу. На представленому графіку пунктирною горизонтальною лінією обмежено мінімальну відносну концентрацію забруднень ($\bar{C}_{e1}^* = C_e/C_0 = 0,1$),

яку необхідно забезпечити при очистці на даній установці. На практиці, зазвичай, ця величина задається технологічними умовами або нормативними документами в залежності від вимог споживача або виробництва.

Забруднення, які в процесі очистки видаляються з води, затримуються і відкладаються в самому завантаженні. З часом, при пропуску і очищенні нових об'ємів суспензії, концентрація затриманих забруднень постійно зростає. При цьому, при досягненні певної величини концентрації частина затриманих раніше забруднень відривається і змивається потоком води, що прояснюється.

В ході експериментів була виконана серія досліджень по визначенню концентрації затриманих завантаженням забруднень. Заміри показали, що

основна маса забруднень затримується у верхніх шарах фільтра протягом всього часу його роботи. Розподіл маси забруднень за висотою шару завантаження залежить від типу зернистого фільтруючого завантаження, виду забруднень, які видаляються при очистці і часу роботи споруди. Як приклад, для випадку початкової концентрації забруднень $C_0 = 50$ мг/л при швидкості фільтрування $V = 6,93$ м/год на рис. 6 показано розподіл маси затриманих в завантаженні забруднень через 20 годин роботи. З графіка випливає, що основна маса забруднень (до 95 %) затрималась між створами №1 – №4, на товщині завантаження 0,4 м. Схожі результати було отримано і в інші години роботи фільтрувальної установки.

В процесі фільтрування при затриманні частинок забруднень відбувається їх накопичення в пустотах між частками завантаження. Це призводить до зменшення об'єму пустот, тобто, до зменшення пористості фільтруючого матеріалу. Можна записати

$$\Delta n = n_0 - n, \quad (19)$$

де Δn – зміна (зменшення) пористості фільтруючого матеріалу протягом часу роботи фільтра; n , n_0 – відповідно, змінна з часом і початкова пористість фільтруючого завантаження.

Величину Δn можна також трактувати як об'єм осаду, який накопичився (затримався) в одиниці об'єму завантаження (питомий об'єм осаду). На рис. 7 представлена експериментальна залежність зміни відносного об'єму осаду ($\Delta \bar{n} = \Delta n/n_0$) від відносного коефіцієнта фільтрації завантаження ($\bar{k} = k/k_0$).

З графіка слідує, що збільшення відносного об'єму осаду $\Delta \bar{n}$ еквівалентно зменшенню вільного порового простору завантаження Δn за рахунок впливу затриманих частинок забруднень викликає суттєве зменшення відносного коефіцієнта фільтрації зернистого завантаження. Характер цієї зміни описується залежністю аналогічній отриманій в досліді Д.Н. Мінца

$$\bar{n} = 1 - \sqrt[3]{\bar{k}}. \quad (20)$$

Очевидно, що величина питомого об'єму осаду Δn повинна визначатись величиною концентрації забруднень (S), які затримані завантаженням фільтра. На рис. 8 представлена дослідна залежність, яка підтверджує збільшення величини питомого об'єму затриманого осаду при збільшенні його відносної концентрації в завантаженні. При досягненні певного значення концентрації затриманого осаду S (в нашому випадку $\bar{S} = S/n_0 C_0 = 1300$) підвищення відносного питомого об'єму осаду більше величини $\Delta \bar{n} = 0,65$ (зменшення пористості фільтруючого завантаження) не відмічається. Це означає, що насиченість порового простору забрудненнями на даній ділянці фільтруючого завантаження досягла свого граничного значення і на ній при подальшій роботі фільтра прояснення суспензії практично не відбувається. Залежність зміни $\Delta \bar{n}$ від \bar{S} може бути представлена у вигляді

$$\Delta \bar{n} = 0,7th(0,00124n_0 C_0 \bar{S}). \quad (21)$$

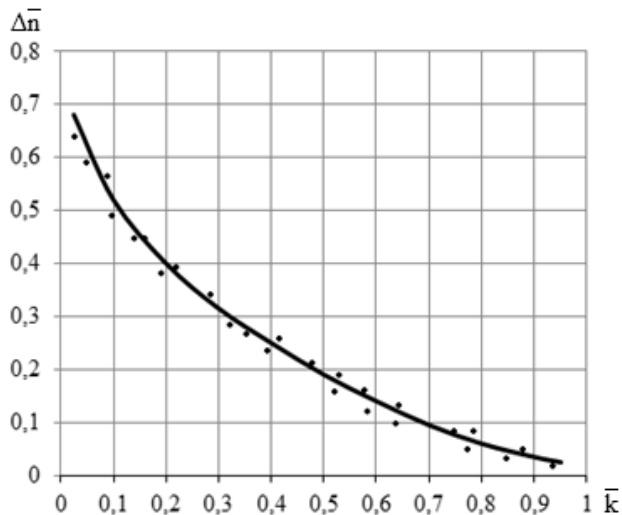


Рис. 7. Зміна відносного об'єму осаду від відносного коефіцієнта фільтрації

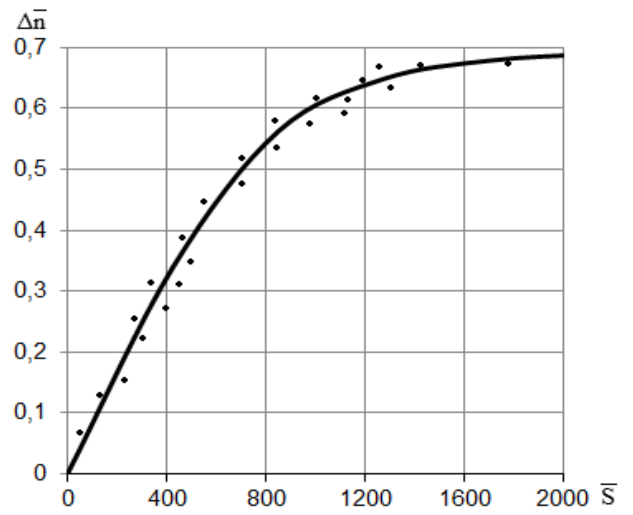


Рис. 8. Залежність відносного питомого об'єму осаду від його концентрації в завантаженні

При аналізі і математичному описанні фільтраційних процесів, які мають місце при проясненні води, важливою характеристикою затриманого осаду служить відношення об'ємної концентрації осаду до об'ємної концентрації твердих частинок в цьому осаді $\gamma = C_{oc}/C_m$. Даний показник також можна виражати через масові концентрації затриманого осаду і твердої фази. На основі проведених експериментальних досліджень отримано залежність показника γ від величини відносного питомого об'єму осаду $\Delta\bar{n}$, яка приведена на рис. 9. З останнього випливає, що при збільшенні відносного питомого об'єму осаду відбувається його ущільнення, що чисельно відображається відповідним зменшенням показника γ . Відповідна залежність має вигляд

$$\gamma = -67\Delta\bar{n} + 57. \quad (22)$$

При проведенні експериментальних досліджень головна увага приділялась аналізу характеристик процесу фільтрування, які мають місце при змінній з часом швидкості руху рідини. На рис. 10 приведені окремі характерні приклади зміни відносної швидкості фільтрування ($\bar{V} = V/V_0$) з часом при різних значеннях початкової швидкості V_0 і початковій концентрації забруднень $C_0 = 100$ мг/л. Аналіз представленого графіка підтверджує той факт, що збільшення початкової швидкості фільтрування суттєво зменшує, а зниження з часом відносної швидкості збільшує термін фільтроциклу. Очевидно, що при заданих початковій і кінцевій концентраціях забруднень існує відповідна оптимальна величина початкової швидкості фільтрування, при якій термін фільтроциклу буде максимальним.

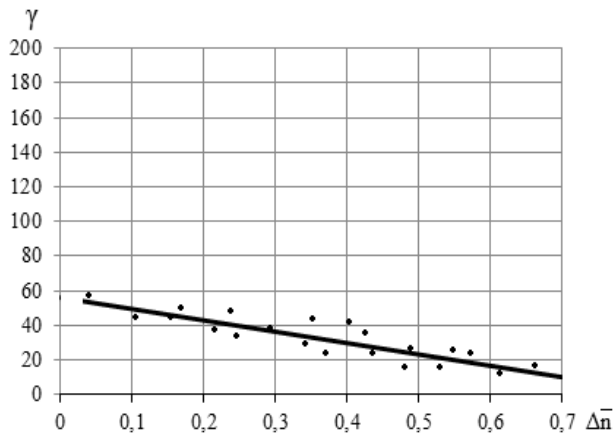


Рис. 9. Зміна показника γ в залежності від величини відносного питомого об'єму осаду $\Delta\bar{n}$

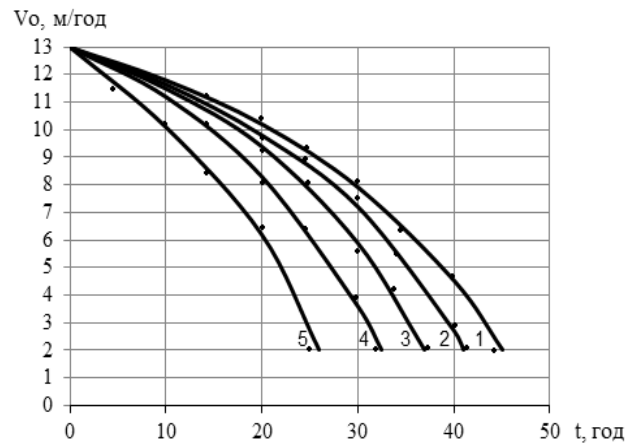


Рис. 10. Визначення часу роботи фільтра при різних \bar{V} : 1. $\bar{V} = 0,2$; 2. $\bar{V} = 0,4$; 3. $\bar{V} = 0,6$; 4. $\bar{V} = 0,8$; 5. $\bar{V} = 0,9$

На основі обробки отриманих в даній роботі експериментальних даних для розглянутих умов отримано величину коефіцієнтів прилипання і відриву частинок забруднень до часток матеріалу завантаження, а також показників степені, які входять у вихідні залежності (4): $a_V = 6,65 \pm 0,3$; $l = 0,8 \pm 0,04$; $\beta_V = 0,025 \pm 0,001$; $q = 0,9 \pm 0,05$.

У п'ятому розділі представлено розроблену методику інженерного розрахунку швидких фільтрів, які працюють зі змінною з часом швидкістю фільтрування, розглянуто приклади розрахунку їх технологічних параметрів. Здійснено порівняльний аналіз отриманих в роботі даних з даними розрахунку за методиками інших авторів. Приведені матеріали по впровадженню результатів дисертаційної роботи при розрахунку і проектуванні реальних фільтрувальних споруд.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз літературних джерел в яких розглядаються закономірності процесу очистки води на швидких фільтрах, втрат напору в зернистому завантаженні, їх математичне моделювання, розрахунок терміну фільтроциклу і товщини фільтруючого шару.
2. На підставі проведеного аналізу обґрунтована фізична (концептуальна) модель процесу вилучення забруднень на швидких фільтрах з зернистою засипкою, в якій науково обґрунтовано доцільність і необхідність врахування змінної в часі швидкості фільтрування на загальні характеристики процесу.
3. На основі фізичної моделі обґрунтовано та побудовано загальну математичну модель прояснення суспензії фільтруванням зі змінною швидкістю, яка складається з трьох блоків: прояснювального, фільтраційного та гідравлічного, що дозволило оцінити вплив різних

факторів і вихідних характеристик на процес очистки. Запропоновано методику її розв'язку.

4. Проаналізовано вплив вихідних параметрів рідини, що очищається, та основних конструктивних і технологічних характеристик розглянутих споруд, в тому числі матеріалу фільтруючого завантаження на ефективність процесу прояснення суспензії.
5. Розроблено конструкцію системи трубопроводів для подачі і розподілу води у фільтрувальній споруді, що дозволило оптимізувати гідравлічні умови роботи даної споруди.
6. Проведено експериментальні дослідження основних параметрів, які впливають на роботу швидкого фільтра при змінній з часом швидкості фільтрування і визначено при цьому закономірності зміни ефекту очистки, втрат напору, пористості зернистого матеріалу і коефіцієнта фільтрації.
7. На основі отриманих дослідних даних із застосуванням спеціальних методик їх обробки визначено коефіцієнти і параметри, які суттєво впливають на ефективність роботи фільтрувальних споруд, зокрема коефіцієнти прилипання α і відриву β частинок забруднень від часток зернистого завантаження.
8. На підставі теоретичних та експериментальних досліджень розроблено інженерну методику розрахунку основних конструктивних і технологічних параметрів швидких фільтрів із зернистим завантаженням, які працюють зі змінною в часі швидкістю фільтрування.
9. Здійснено апробацію запропонованої методики розрахунку, проведено практичне впровадження даних розробок при проектуванні швидких фільтрів для очистки води в робочі проекти ТОВ "Юнібуд Енерго сервіс" м. Київ, а також в проекти ТОВ "ПОБІ Вотер Інжиніринг" м. Київ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kravchuk O. Functioning of filter structures in changing velocity conditions over time // Underwater technologies. Industrial and civil engineering (Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія). К., 2017. – Вип. 6. – С. 65-73.

2. Поляков В.Л. Математическое моделирование осветления суспензии фильтрованием с существенно переменной скоростью. / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Вісник ОДАБА. – Одеса: Optimum, 2015. – Вип. 59. – С. 228 – 235.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в проведенні порівняльного аналізу запропонованої і існуючих фізичних і математичних моделей, які описують роботу фільтрів зі змінною в часі швидкістю фільтрування.

3. Поляков В.Л. О гидравлике водоочистных безнапорных фильтров на начальных стадиях фильтрования / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2015. – Вип. 25. – С. 223 – 231.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в аналізі розрахункових залежностей і графіків та оцінці факторів, які впливають на характер роботи споруд в початкові періоди фільтрування.

4. Кравчук О.А. До зміни гідравлічних характеристик зернистого завантаження фільтрів в процесі їх роботи // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, 2016. – Вип. №2 (84). – С. 316 – 319.

5. Кравчук О.А. Дослідження гідравлічного опору завантаження фільтрів // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. – К.: КНУБА, 2016. – Вип. 27. – С. 208 – 213.

6. Кравчук О.А. До розрахунку дії параметрів швидкого фільтра при істотній зміні швидкості фільтрування // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 63. – С. 215-221.

7. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження зміни швидкості фільтрування під час роботи швидкого фільтра // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 64. – С. 135-141.

8. Кравчук О.А. Експериментальне дослідження втрат напору під час роботи швидкого фільтра зі змінною з часом швидкістю фільтрування // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. К.: КНУБА, 2017 – Вип. 89. – С. 56-62.

9. Поляков В. Л. Теоретические исследования технологических и конструктивных параметров при фильтровании с изменяющейся во времени скоростью / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Чиста вода. Фундаментальні, практичні та промислові аспекти. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. – К.: НТУУ “КПІ”, 2015. – С. 167-170.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в проведенні математичних розрахунків параметрів фільтрування при роботі споруд зі змінною швидкістю.

10. Поляков В.Л. Розрахунок освітлення слабokonцентрованої суспензії на швидких фільтрах при значній зміні з часом швидкості фільтрування / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Матеріали 71-ї науково-технічної конференції. 15-17 березня 2016 р. – Харків: ХНУБА, 2016. – С. 37.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає у виконанні розрахунків розглядуваних споруд при різних параметрах очищеної рідини.

11. Поляков В.Л. Про деякі результати теоретичних і експериментальних досліджень дії водоочисних фільтрів при змінній з часом швидкості фільтрування / В.Л. Поляков, О.А. Кравчук // Тези за матеріалами VII Всеукраїнського наукового семінару “Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур”. 11-12 жовтня 2016 р. – Харків: ХНУБА, 2016. – С. 18-20.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в обробці даних існуючих експериментальних досліджень і порівнянні їх з результатами теоретичних розрахунків.

12. Патент України на винахід №112509. Фільтр для очищення води / Юрков Є.В., Кравчук О.А., Юрков О.Д.; заявл. 28.09.2015; Опубл. 12.09.2016, Бюл. №17.

Особистий внесок Кравчука О.А. полягає в розробці конструкції системи трубопроводів для подачі і розподілу води у фільтрувальній споруді.

АНОТАЦІЯ

Кравчук О.А. Фільтрування рідини зі змінною швидкістю руху потоку. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.23.04 – водопостачання, каналізація. Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена актуальному питанню підвищення ефективності роботи швидких фільтрів з зернистим завантаженням.

У роботі наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень основних характеристик швидких фільтрів з зернистим завантаженням при швидкості, яка істотно змінюється з часом. Представлено трьохблочну математичну модель фільтрування води на швидких фільтрах з зернистою засипкою для випадку змінної з часом швидкості фільтрування, яка дозволяє аналітично визначити основні характеристики даного процесу та тривалість фільтроциклу. Проведено серію експериментальних досліджень роботи швидких фільтрів на лабораторній установці та проаналізовано отримані результати. Розроблено методику інженерного розрахунку швидких фільтрів, які працюють зі змінною з часом швидкістю фільтрування, розглянуто приклади розрахунку. Здійснено порівняльний аналіз отриманих в роботі даних з даними розрахунку за існуючими методиками. Приведені матеріали по впровадженню результатів дисертаційної роботи при розрахунку і проектуванню реальних очисних споруд.

Ключові слова: швидкий фільтр, фільтрування, суспензія, фільтруюче завантаження, фільтрат, фільтроцикл, осад.

АНОТАЦІЯ

Кравчук А.А. Фильтрование жидкости с переменной скоростью движения потока. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация. Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной проблемы повышения эффективности работы скорых фильтров с зернистой загрузкой.

В работе приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований основных характеристик скорых фильтров с зернистой загрузкой при изменяющейся во времени скорости. Представлена трехблочная математическая модель фильтрования воды для случая переменной во времени скорости фильтрования, включающая зависимости для описания процесса осветления очищаемой жидкости, уравнения фильтрационного блока и зависимости, определяющие гидравлику потока. Предложено оригинальное аналитическое решение исходной системы дифференциальных уравнений и на его основе получены достаточно простые зависимости для расчета основных технологических и конструктивных характеристик исследуемых сооружений. В том числе, степень очистки, длительность фильтроцикла, толщина слоя зернистой загрузки. Проведена серия экспериментальных исследований работы скорых фильтров на лабораторной установке и проанализированы полученные результаты. Определен характер изменения коэффициента фильтрации с течением времени в процессе работы фильтра, величины потерь напора в фильтрующей загрузке, изменение уровня жидкости над засыпкой, характер изменения скорости фильтрования на протяжении фильтроцикла, интенсивность задержания частиц загрязнений. Отдельные исследования выполнены по анализу процесса накопления загрязнений по времени и по высоте загрузки, в том числе изменения их концентрации и относительного насыщения порового пространства. Определено, что основная масса загрязнений задерживается на высоте слоя загрузки толщиной до 0,2 м.

На основании обработки экспериментальных данных получены эмпирические формулы и необходимые параметры для расчета коэффициентов прилипания и отрыва частиц загрязнений от частиц фильтрующей засыпки. Разработана методика инженерного расчета скорых фильтров, работающих с переменной во времени скоростью фильтрования, рассмотрены примеры расчета. Представлен сравнительный анализ полученных в работе данных с результатами расчета по существующим методикам. Приведены материалы по внедрению результатов диссертационной работы при расчете и проектированию реальных очистных сооружений.

Ключевые слова: скорый фильтр, фильтрование, суспензия, фильтрующая загрузка, фильтрат, фильтроцикл, осадок.

ABSTRACT

Kravchuk O.A. Fluid filtration under variable velocity of flow. – Manuscript. The thesis is intended to obtain Candidate of Technical Sciences degree (PhD) within specialty 05.23.04 – water supply and sewage. – Kyiv National University of Construction and Architecture. – Kyiv, 2018.

This thesis work is dedicated to the actual problem of an increase in the effectiveness of rapid sand filters operation with granular medium. The results of theoretical and experimental research of main filtration process characteristics of rapid sand filters with granular medium under the velocity which varies over time are adduced in the paper. The three-block mathematical model of water filtration on rapid sand filters with granular medium for the case of variable velocity over time, which allows to define main characteristics of the process and filtration cycle duration analytically is presented. The series of experimental research of the rapid filters operation on a laboratory installation was conducted and the obtained results were analyzed. The method of rapid sand filters engineering calculation which functioning under variable filtration velocity over time was elaborated, examples of calculation were considered. The comparative analysis of the data, obtained in the work, with calculation data according to the existing methods was completed. The materials of the thesis work results implementation on real treatment structures calculation and designing were substantiated.

Keywords: rapid filter, filtration, suspension, filtration cycle, filtration material, filtrate, sediment.