

---

---

## Розділ 2. Основи природокористування та безпека життєдіяльності

---

---

УДК 628

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЛЬМАТАЖУ ФІЛЬТРІВ ТРУБЧАСТИХ КОЛОДЯЗІВ СПОЛУКАМИ ЗАЛІЗА

А.М. Тугай, д-р техн. наук, проф.;  
Я.А. Тугай, канд. техн. наук, доцент  
(Київський національний університет  
будівництва і архітектури)

*Узагальнені лабораторні та виробничі дослідження кольматажу фільтрів трубчастих колодязів сполуками заліза, як такими, що найчастіше присутні у підземних водах України. Наведений метод розрахунку кольматажу фільтрів при недостатній концентрації закислих форм заліза та кисню у вихідній воді. Показано вплив кольматажу фільтрів залізистими відкладеннями на продуктивність трубчастих колодязів.*

*Обобщены лабораторные и производственные исследования кольматажа фильтров трубчатых колодцев соединениями железа, которые наиболее распространены в подземных водах Украины. Приведен метод расчета кольматажа фильтров при недостаточной концентрации закисных форм железа и кислорода в исходной воде. Показано влияние кольматажа фильтров железистыми отложениями на производительность трубчатых колодцев.*

*The article sums up laboratory and full-scale researches on filter colmatage of piped wells by iron compounds, which are typical for Ukrainian groundwater. Calculation method for colmatage of filters at low concentrations of reduced form of iron and oxygen in initial water is given. Influence of filter colmatage by iron-containing deposits on debit of water wells is shown.*

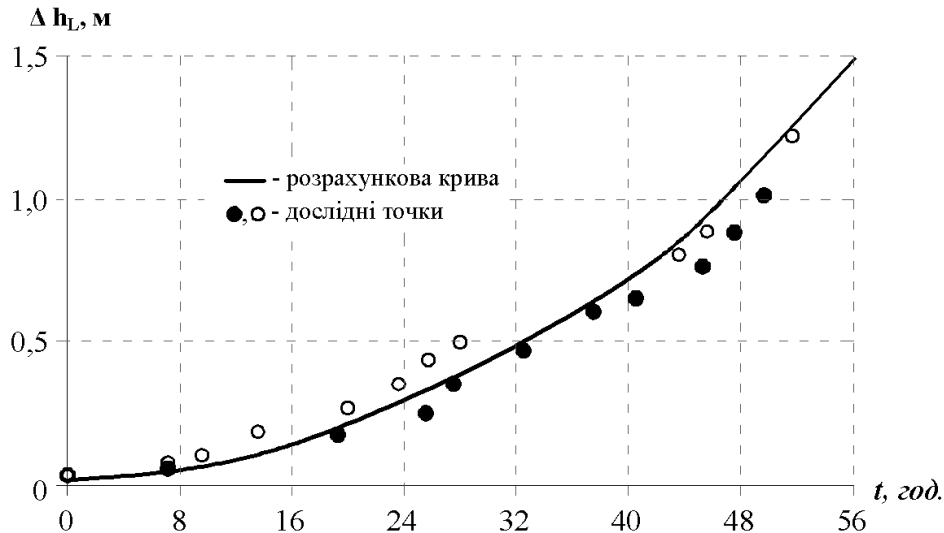
Широке дослідження існуючих методик розрахунку процесів кольматажу і декольматажу фільтрів, забруднених сполуками заліза, проведено як вітчизняними, так і зарубіжними авторами в лабораторних і виробничих умовах

© А.М. Тугай, Я.А. Тугай, 2012

[1,2,3,4]. При цьому порівняльний аналіз переважно виконано для умов, коли у вихідній підземній воді концентрація закислих форм заліза значно перевищує допустиму норму, а прийнята технологія очистки дозволяє в достатній кількості забезпечити киснем процес знезалізнення ( $C > 3 \text{ мг/л}$ ). У цьому випадку процес накопичення осадів заліза на фільтрах проходить швидко, з інтенсивною динамікою. Стосовно водозабірних свердловин, такий процес з високою динамікою накопичення осаду відбувається при внутрішньопластовому знезалізненні, а регенерацію свердловин проводять часто з використанням різних технологій їх обробки. Враховуючи, що механізми і фізико-хімічні процеси кольтматації фільтра свердловин у цьому випадку будуть такі ж, як на очисних фільтрах, і відрізнятимуться тільки особливістю потоку в області фільтрації, лабораторні дослідження, які проведені на різних дослідних установках в умовах лінійного фільтраційного потоку, на наш погляд, можуть бути використані при проведенні порівняльного аналізу у випадку радіального фільтраційного потоку до свердловин. Подібні підходи застосовані в роботах [5,6] при оцінці й аналізі результатів теоретичних досліджень параметрів внутрішньопластового знезалізнення підземної води за допомогою свердловин.

Стосовно очисних фільтрів, запропоновані методи розрахунку знезалізнення, які розроблені на основі загальної математичної моделі, побудованої для лінійного потоку, досить ґрунтовно апробовані в роботі [7]. При цьому були використані дослідні дані, отримані в лабораторних і виробничих умовах різними авторами на фільтрах з різними завантаженнями і режимами фільтрування [8]. В цілому ця апробація показала достатню достовірність і надійність запропонованих моделей і методів розрахунку. Тому вважаємо, що запропоновані моделі і методи розрахунку, розроблені для умов радіального фільтраційного потоку на основі тих же механізмів і фізико-хімічних процесів при інтенсивній динаміці їх протікання переважно за рахунок гетерогенної реакції окислення, повинні давати також задовільні результати. В якості прикладу розглянемо дослідження кольтматації фільтра, проведені в лабораторних умовах при інтенсивній динаміці накопичення осаду заліза [7]. Опис дослідної установки і методики проведення цих дослідів наведено в цій роботі, тому тільки зазначимо, що вміст загального заліза у вихідній воді коливався в межах  $C_{01} \approx 2,5 \dots 10 \text{ мг/л}$  (в тому числі закисного заліза не менше від 70%), забезпечення процесу киснем у достатній кількості ( $C_{02} > 3 \text{ мг/л}$ ) здійснювалось методом спрощеної аерації. Дослідження проводились у лабораторних умовах на циліндричних фільтрах, які мали завантаження з волокнисто-пористого полістиролу (ВПП) і з гранул пінополістиролу (ППС). У роботі наведені результати цих досліджень, проведених при різних вихідних значеннях концентрації  $C_{01}$ , швидкості фільтрації  $V_0$  і параметрів завантаження. Для можливості зіставлення дослідних даних з розрахунковими спочатку було проведено аналіз значень коефіцієнтів фільтрації  $k$ , визначених за даними з використанням для цього розробленої в роботі [7] методики обробки. Зіставлені

теоретичні і дослідні дані зміни  $k = k(\sigma_3)$  для завантажень з ВПП  $d = 0,12$  мм і  $p_0 = 0,79$  і з ППС  $d = 0,5...3,0$  мм, розглянуті у цій роботі, дозволили одержати наступні значення:  $\alpha = 1,00$   $\text{дм}^3/\text{г}$  і  $k_0 \approx 90$  м/год для ВПП і  $\alpha = 1,10$   $\text{дм}^3/\text{г}$  і  $k_0 \approx 110$  м/год для ППС. В цілому аналіз одержаних дослідних даних показав, що значення  $\alpha$  для завантаження з ВПП у кожному досліді були менші ніж для завантаження з ППС, а концентрація осаду гідроксиду заліза  $\sigma_3$  в кінці досліді для завантаження з ВПП була більша ніж для завантаження з ППС.



**Рис.1. Зростання втрат напору  $\Delta h$  в фільтрі з ВПП завантаженням**

На рис.1 показано зростання втрат напору у фільтрі  $\Delta h(L,t)$  при  $V_0 = const$ , що відповідає зниженню рівня у свердловині  $S(r,t)$  при  $Q = const$ . У роботі [7], крім графіка рис.1., наведені також результати порівняльного аналізу втрат напору на очисних фільтрах з іншими типами завантаження (гравійно-піщане, гранули пінополістиролу, керамзиту).

Здійснений порівняльний аналіз показав, що результати розрахунків у всіх розглянутих випадках добре узгоджуються з дослідними даними, одержаними у фільтрах з різним завантаженням і режимами фільтрування.

Таким чином, сказане вище зрештою дає підставу зробити висновок, що розроблені загальні математичні моделі, які більш повно описують механізми і особливості процесів формування кольматажу фільтрів, дозволяють розробити досить надійні і достовірні методи розрахунку необхідних технологічних і конструктивних параметрів. Порівняно з розглянутими вище, інший випадок формування кольматажу спостерігався часто на фільтрах свердловин, коли концентрація закислих форм заліза у вихідній воді була незначною і знаходилась десь у межах допустимої, а концентрація розчиненого кисню також незначна і процес окислення лімітувався нестачею кисню. У цьому випадку, як вже зазначалося, процес кольматажу фільтра буде проходити з дуже повільною динамікою накопичення осаду. При цьому можна прийняти, що перехід закислих форм заліза в гідроксидні відбувається переважно за спрощеною моделлю кінетики гомогенної реакції в розчині з урахуванням впливу різних факторів на

проходження реакції і в цілому процесу кольтатації. Вважається, що весь утворений осад із сполук заліза осаджується в порах матеріалу фільтра. Таким чином, процес кольтатації фільтра в цьому випадку будемо розглядати на основі наступної математичної моделі:

$$n_c \frac{\partial C_1}{\partial t} = \frac{q}{r} \frac{\partial C_1}{\partial r} - \frac{\partial \sigma_3}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma_3}{\partial t} = k C_1 \quad (2)$$

при початкових і граничних умовах  $C_1(r,0)=0$ ,  $C_1(r_1,t)=C_{01}$ ,  $\sigma_3(r,0)=0$ . У результаті розв'язання цих рівнянь одержимо при  $\bar{t} > \bar{r}$ :

$$C_1(r,t) = C_{01} e^{-\bar{r}}, \quad (3)$$

$$\sigma_3(r,t) = n_c C_{01} e^{-\bar{r}} (\bar{t} - \bar{r}), \quad (4)$$

де  $\bar{r} = \frac{(r_1^2 - r^2)K}{q}$ ,  $\bar{t} = \frac{k}{n_c} t$ ,  $k$  - узагальнений коефіцієнт, який визначає швидкість проходження реакції і осідання з води важкорозчинних солей,  $n_c$  - усереднене розрахункове значення пористості, інші позначення наведені вище. Згідно з попередніми рекомендаціями усереднене значення коефіцієнта фільтрації по всьому об'єму фільтра приймаємо:

$$k_c = k_0 e^{-\alpha \sigma_{3c}(t)}. \quad (5)$$

Вираз для усередненої величини масової концентрації осаду визначається за формулою:

$$\sigma_{3c}(t) = \frac{2}{1 - \bar{r}_c^2} \int_0^1 \bar{r} \sigma_3(\bar{r}, \bar{t}) d\bar{t} = n_c C_{01} \left[ (\bar{t} - 1)(1 - e^{-\bar{r}_c}) + \bar{r}_c e^{-\bar{r}_c} \right], \quad (6)$$

де  $\bar{r}_c = \frac{r_c}{r_1}$ ,  $\bar{r} = \frac{r}{r_1}$ ,  $\bar{t} = \frac{K}{n_c} t$ ,  $\bar{r}_c = \frac{(r_1^2 - r_c^2)K}{2q}$ ,  $q = \frac{Q}{2\pi m}$ .

При  $\bar{r}_c < 0,5$  і  $\bar{t} \gg 1$ , тобто для більшості практичних випадків маємо:

$$\sigma_{3c}(t) = C_{01} K t. \quad (7)$$

Величина зниження рівня у свердловині буде визначатися за формулою:

$$S(t) = \frac{Q}{2\pi k_c m} \ln \frac{r_1}{r_c}, \quad (8)$$

а початкове значення (на початку експлуатації) буде:

$$S_0 = \frac{Q}{2\pi k_0 m} \ln \frac{r_1}{r_c}, \quad (9)$$

Порівнюючи (8) і (9), одержимо таке співвідношення для питомих витрат:

$$\frac{q(t)}{q_0} = \frac{k_c(t)}{k_0} = e^{-\alpha\sigma_{3c}(t)}. \quad (10)$$

Якщо прийняти концентрацію  $\sigma_{3c}$  за формулою (7), то розрахунковій залежності для визначення динаміки зниження питомих дебітів за рахунок кольматації фільтра можна надати вигляду:

$$\frac{q(t)}{q_0} = e^{-\beta \cdot t}, \quad (11)$$

в якій узагальнений параметр кольматації (коефіцієнт “старіння свердловини”)  $\beta^*$  визначається за формулою:

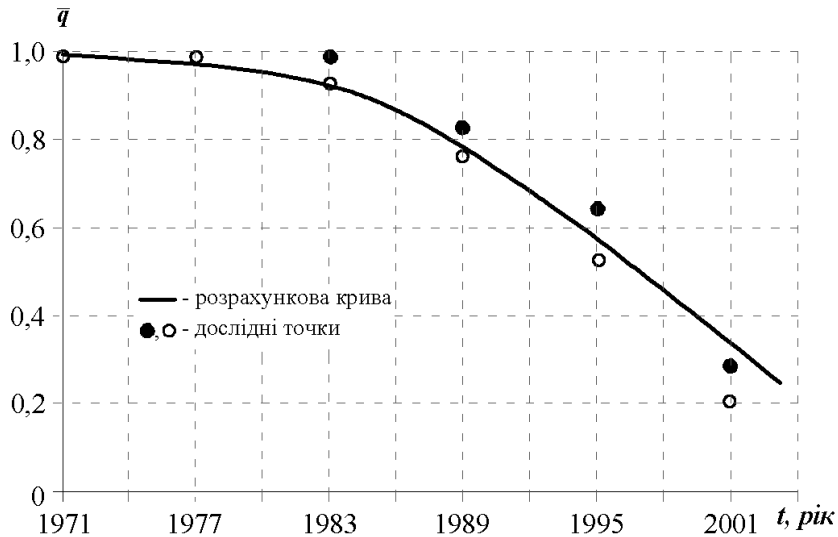
$$\beta^* = \alpha C_{01} K. \quad (12)$$

Для цього випадку широкі багаторічні дослідження кольматації свердловин, проведені нами в натурних умовах під час їх експлуатації в ряді регіонів України, викладені у роботі [9].

При цьому в якості нормативних документів для проведення фізико-хімічних і технологічних аналізів води свердловин, що досліджувались, були використані матеріали державних стандартів (ДЕСТ «Вода питна», ДСанПіН, Руководство по химическому и технологическому анализу воды).

Характеристики і параметри водоносних горизонтів, умови експлуатації свердловин і їх параметри, методики проведення й обробки дослідів, необхідне для цього обладнання і апаратура, а також аналіз одержаних результатів наведені в роботах [9] та ін. Слід зазначити, що за наявності у воді навіть у незначних кількостях заліза у формі  $Fe^{2+}$  і особливо після його трансформації у форму  $Fe^{3+}$  процес кольматації значно посилюється. Обробка дослідних даних з використанням формул (11) і (12) показала, що за наявності у воді заліза коефіцієнт  $\beta^*$  змінювався в межах від  $1,5 \cdot 10^{-2}$  до  $2,5 \cdot 10^{-2}$  рік<sup>-1</sup>, а за наявності у воді заліза, але в умовах підвищеної жорсткості води коефіцієнт  $\beta^*$  змінювався в межах  $1,5 \cdot 10^{-2}$  до  $4,0 \cdot 10^{-2}$  рік<sup>-1</sup>. При цьому менші значення коефіцієнта  $\beta^*$  приймаються в перші роки експлуатації свердловин, коли кількість утвореного кольматанту ще незначна і мало впливає на продуктивність свердловин, і більші значення коефіцієнта  $\beta^*$  приймаються після багаторічної їх експлуатації, коли кількість утвореного осаду вже значно впливає на продуктивність свердловин, суттєво знижуючи її дебіт. На рис. 2 в якості прикладу зіставлені дані багаторічних досліджень роботи свердловин, які переважно кольматуються сполуками заліза, з результатами розрахунків згідно з наведеними вище рекомендаціями. У розглянутих випадках, як це видно з рис.2, результати розрахунків добре узгоджуються з дослідними даними.

Тому в зазначених умовах значно уповільненої динаміки накопичення осаду переважно сполуками заліза, тобто при багаторічній експлуатації свердловин, ефективність їх роботи в часі може бути оцінена і наближено визначена за запропонованою вище методикою розрахунків.



*Рис.2. Динаміка зниження питомого дебіту свердловин внаслідок їх кольматації переважно сполуками заліза при підвищеній жорсткості води*

\* \* \*

1. Тугай А.М., Олійник О.Я., Тугай Я.А. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу, Харків ХНАМГ, 2004 - 240 с.
2. Алексеев В.С. Методика прогноза химического кольматанта фильтров водозаборных скважин / Водоснабж. и сан.техника. - 1968, № 10. - С. 28 - 31.
3. Муфтахов А.Ж. К расчету дебита скважин с измененной проницаемостью призабойной зоны. Труды института ВОДГЕО, гидрогеология. - М. - Вып. 13. 1966.- С. 181-186.
4. Тугай А.М., Тугай Я.А. Кольматаж фільтрів і при фільтрових зон водозабірних свердловин та методи їх регенерації// Будівництво України, К.: - ВП "Гранмна". - 2002, № 5 - С. 27 - 31.
5. Алексеев В.С., Коммунар Г.М., Ямбулатова Ф.Х. Расчеты установок обезжелезивания подземных вод в водоносных пластах // Водосн. и сан. техн. - 1984. -№4.-С.16-18.
6. Коммунар Г.М., Середкина Е.В.Тегля В.Г. и др. Опыт внутрислоевой очистки подземных вод от железа // Водосн. и сан. техн. - 1997. - № 11.-С. 10-11.
7. Киселев С.К. Моделирование и расчеты обезжелезивания воды на очистных фильтрах с учетом изменения гидравлических свойств загрузки // Дис. канд. техн. наук, 05.23.04. - К. - 2000. - 158 с.
8. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления / Пивовар Н.Г., Бугай И.Г., Фридрихсон В.А. и др. НАНУ, Институт гидромеханики. - К. - 2000. - 332 с.
- 9.Тугай А.М., Прокопчук І.Т. Розрахунок додаткових опорів кольматажу фільтрів свердловин з використанням дослідних даних // Вестник национального технического университета "ХПИ". - Харків.: - 2002. - том 1. - С. 84-88.

*Отримано: 30.01.2012 р.*