

УДК 628.16

**Корнійчук К. С., аспірант** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

### **МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ НАПІРНОГО ФІЛЬТРА З ПІНОПЛІСТИРОЛЬНОЮ ЗАСИПКОЮ ПРИ КОНТАКТНОМУ ЗНЕЗАЛІЗНЕННІ ВОДИ**

**Наведені результати лабораторних досліджень знезалізнення підземних вод на фільтрах з пінополістирольною засипкою при напірному режимі фільтрування.**

**Ключові слова:** контактне знезалізнення, напірний фільтр, втрати напору, рівняння регресії.

Вода є не лише важливим елементом живої та неживої матерії, а й невід'ємною частиною життєдіяльності людини. Обсяг споживаної води на промисловість, сільське та домашнє господарство оцінюється в 250 м<sup>3</sup> в рік на душу населення і існує тенденція до збільшення цього значення [1, 2].

Водопостачання більшості малих населених пунктів північних, західних, північно-східних та деяких інших областей України проводиться із підземних джерел. Здебільшого, підземна вода містить підвищену кількість заліза (найчастіше до 5 мг/л), сірководню, вільної вуглекислоти [3]. Надмірна кількість заліза у воді спричиняє появу неприємного запаху, каламутності, забарвлення води, заростання водопровідних труб. А використання такої води для питних потреб сприяє алергійним реакціям, хворобам крові, захворюванню печінки. Тому, перед використанням води необхідно проводити видалення даного компонента [4].

**Питаннями знезалізнення та фільтрування води** займалися вітчизняні й зарубіжні вчені, такі як: Г.І. Ніколадзе, А.М. Перлина, В.О. Орлов, О.Я. Олійник, В.І. Станкявічюс, К.А. Мамонтов, П.Д. Хоружий, С.Ю. Мартинов, М.А. Сафонов, Лівінгстоун та інші.

Для видалення заліза з води використовують реагентний, безреагентний, катіонообмінний та біохімічний методи. Вибір методу, технологічної схеми і водоочисних споруд знезалізнення води залежить від багатьох факторів. Головні з них – форма знаходження заліза у воді, хімічний склад води, кількість розчиненого кисню та вуглекислого газу, продуктивність станції, величини рН і Eh.

Найчастіше для знезалізнення підземних вод застосовують безреа-

гентний метод (спрощена аерація та фільтрування), оскільки він простіший та дешевший, при наступних параметрах вихідної води: рН – не менше 6,8; лужність – більше  $(1+Fe^{2+}/28)$  моль/м<sup>3</sup>; вміст загального заліза – не більше 10мг/л, в тому числі, двовалентного – не менше 70%; вміст сірководню – не більше 0,5мг/л та деяких інших обмеженнях.

Знезалізнювати воду можна за безнапірною або напірною схемами. В порівнянні з безнапірними, в індивідуальних схемах водопідготовки, напірні не вимагають встановлення додаткового накопичувача очищеної води та підвищувального насосу, що значно здешевлює вартість всієї системи. Проте, виникають певні ускладнення при влаштуванні аерації води.

На кафедрі водопостачання, водовідведення та бурової справи була розроблена та запатентована напірна установка для знезалізнення підземних вод [5]. До основних її елементів належать: свердловинний насос, трубопровід подачі підземної води на очищення, водоповітряний ежектор, трубопровід подачі водо-повітряної суміші, зворотний клапан, трубопровід подачі аерованої води, напірний пінополістирольний фільтр, що оснащений вантузом, трубопровід відведення очищеної води споживачу, трубопровід скиду промивної води в каналізацію, вентилі для керування режимом фільтрування та промивання. В даній установці витрата води, що проходить через ежектор не залежить від водорозбору споживачами, оскільки він працює від свердловинного насосу, при чому, ступінь насичення вхідної води киснем можна регулювати за допомогою вентиля, який розміщений перед водоповітряним ежектором.

**На ефективність знезалізнення** також суттєво впливає тип фільтруючої засипки. Особливу увагу заслуговують фільтри з плаваючою пінополістирольною засипкою. Пінополістирольна засипка за ефективністю очищення вод не поступається традиційній піщаній засипці, але має ряд переваг – покращуються умови промивки, при якій проходить більш повне та швидке видалення затриманого в порах осаду гідроксиду заліза, значно легше здійснюються операції по завантаженню фільтрів [6, 7, 8]. Крім того, при роботі фільтрів з плаваючими засипками не потрібно промивних насосів та ємкостей для накопичення води на промивку.

Одними з основних показників роботи фільтрувальних споруд є залежності зростання втрат напору та зміна якості фільтрату впродовж фільтрування, які можна встановити з застосуванням методу планування багатофакторного експерименту.

**Під плануванням експерименту** розуміється процедура вибору числа дослідів та умов їх проведення, необхідних для вирішення поставленого завдання з необхідною точністю. Всі фактори, що визначають процес, змінюються одночасно за спеціальними правилами, а результати експерименту представляються у вигляді математичної моделі [9].

Знаходження математичної моделі певного процесу за допомогою повнофакторного експерименту складається з наступних етапів:

- 1-ий етап: планування експерименту;
- 2-ий етап: проведення експерименту;
- 3-ій етап включає:
  - перевірка відтворюваності, тобто встановлення однорідності вибіркової дисперсії;
  - отримання математичної моделі;
  - перевірка її на достовірність описання процесу, який досліджується.

Дослідження процесу знезалізнення води проводились в лабораторії кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи НУВГП. Важливим завданням було оптимізувати процес знезалізнення води на напірних фільтрах з пінополістирольною засипкою, еквівалентним діаметром  $d_{\text{екв.}}=2,8$  мм, висотою  $h_{\text{зас.}}=1,0$  м. Для цього, було прийнято три варійовані фактори:

1. Швидкість фільтрування є одним із важливих параметрів роботи водоочисних фільтрів, від якого залежить кількість забруднень, затриманих в товщі засипки. Даний параметр залежить від гранулометричного складу фільтруючої засипки. В лабораторних умовах був досліджений діапазон швидкостей  $V_{\phi}=3,0$  м/год до  $V_{\phi}=7,0$  м/год;

2. Вихідна концентрація заліза. Підземні водоносні горизонти України мають підвищений вміст заліза, в більшості випадків, до  $5 \text{ мг/дм}^3$  [3, 8]. Тому, в лабораторних умовах було досліджено вихідну концентрацію заліза  $Fe_{\text{вх.}}=1 \dots 5 \text{ мг/дм}^3$ ;

3. Тривалість фільтрування починається з моменту запуску фільтра в роботу та закінчується при проведенні процесу промивки. Фільтр виводиться на промивку коли втрати напору у ньому досягають  $6 \dots 8$  м, або ж при значному погіршенні якості фільтрату. Результати лабораторних досліджень вказують на ефективність знезалізнення на фільтрах з пінополістирольною засипкою, еквівалентний діаметром  $2,8$  мм, висотою шару  $1,0$  м, протягом  $T_{\phi}=8$  год.

Інтенсивність, час та спосіб промивання – дані фактори залишалися незмінними.

На основі повнофакторного експерименту були побудовані матема-

тичні моделі по втратах напору та по ефекту знезалізнення процесу напірного фільтрування при  $H_{зач}=1,0$  м,  $d_{скв}=2,8$  мм, швидкості фільтрування  $V_{ф}=3,5,7$  м/год та вхідній концентрації заліза  $1,3,5$  мг/дм<sup>3</sup>.

Математичний опис розглянутого процесу представлений у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (1)$$

Матриця планування експерименту  $2^3$  при побудові математичної моделі по втратах напору представлена в табл. 1, по ефекту знезалізнення в табл. 2.

Таблиця 1

Матриця планування експерименту втрат напору

Номер досліджу	Фактори							Втрати напору Н, см	
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	V, м/год	[Fe], мг/дм <sup>3</sup>	t, год	перший	другий
1	1	-1	-1	-1	3	1	1	2,8	3,1
2	1	-1	1	1	3	5	8	6,1	6,5
3	1	-1	1	-1	3	5	1	3,5	3,6
4	1	-1	-1	1	3	1	8	5,9	5,8
5	1	1	-1	-1	7	1	1	7,7	7,8
6	1	1	-1	1	7	1	8	11,2	11,1
7	1	1	1	-1	7	5	1	11,1	11,2
8	1	1	1	1	7	5	8	31,7	31,9

Таблиця 2

Матриця планування експерименту ефекту знезалізнення

Номер досліджу	Фактори							Концентрація заліза, мг/дм <sup>3</sup>	
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	V, м/год	[Fe], мг/дм <sup>3</sup>	t, год	перший	другий
1	1	-1	-1	-1	3	1	1	0,11	0,13
2	1	-1	1	1	3	5	8	0,19	0,18
3	1	-1	1	-1	3	5	1	0,23	0,21
4	1	-1	-1	1	3	1	8	0,01	0,01
5	1	1	-1	-1	7	1	1	0,19	0,21
6	1	1	-1	1	7	1	8	0,08	0,06
7	1	1	1	-1	7	5	1	0,38	0,37
8	1	1	1	1	7	5	8	0,54	0,52

Однорідність дисперсії (відтворюваність дослідів) оцінювали за критерієм Кохрена:

$$G_{\text{доc}} = \frac{S_{\text{макс}}^2}{\sum_{i=1}^N S_i^2}, \quad (2)$$

де  $G_{\text{доc}}$  – критерій Кохрена (розрахунковий);  $S_{\text{макс}}^2$  – максимальна дисперсія дослідів;  $S_i^2$  – дисперсія серії паралельних дослідів.

$$S_i^2 = \frac{\sum_j^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{(m-1)}, \quad (3)$$

де  $y_{ij}$  – значення функції відгуку в  $j$ -му паралельному досліді  $i$ -го досліді;  $\bar{y}_i$  – середнє значення функції відгуку в  $i$ -му досліді;  $m$  – кількість паралельних дослідів.

Досліди вважаються відтворюваними, якщо розрахункове значення критерію Кохрена не перевищує табличне значення  $G_{\text{доc}} \leq G_{\text{таб}}$ . Табличне значення критерію Кохрена залежить від рівня значимості (як правило  $p=0,95$ ) та числа ступенів свободи  $q = m - 1$ .

Для нашого досліді табличне значення критерію Кохрена становило  $G_{\text{таб}} = 0,68$ . Оскільки розрахункове значення  $G_{\text{доc}}$  в обох випадках не перевищує табличне значення  $0,4 \leq 0,68$ ,  $0,18 \leq 0,68$ , то досліді вважаються відтворюваними.

Результати розрахунків дисперсій та ефектів втрат напору розраховувались в табличній формі.

В загальному вигляді коефіцієнти рівняння регресії визначалися за формулою

$$b_{jk} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \bar{y}_i \cdot x_{ij} \cdot x_{ik}, \quad (4)$$

або

$$b_0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \bar{y}_i. \quad (5)$$

$$b_j = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \bar{y}_i \cdot x_{ij}. \quad (6)$$

Таблиця 3

Коефіцієнти рівняння регресії

	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{123}$
[H]	10,06	5,4	3,14	3,71	2,88	2,3	2,14	2,18
[Fe <sub>ф</sub> ]	0,214	0,08	0,114	- 0,015	0,045	0,021	0,045	0,026

Для перевірки значимості коефіцієнтів рівняння регресії знаходили довірчий інтервал:

$$\Delta a = \pm \frac{t}{N} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{ij} - y_i)^2}{(m-1)}}, \quad (7)$$

де  $t$  – табличне значення критерію Ст'юдента при 5% рівні значимості та числі степенів свободи

$$f = N \cdot (m - 1) = 8 \cdot (2 - 1) = 8, \text{ тоді } t = 2,306.$$

Коефіцієнт рівняння регресії значимий, коли його абсолютна величина більша за довірчий інтервал, тобто

$$|b| > \Delta a. \quad (8)$$

Порівнявши значення коефіцієнтів регресії та абсолютної величини довірчого інтервалу  $\Delta a = 0,12$ ,  $\Delta a = 0,01$  можна зробити висновок, що усі коефіцієнти є значимі.

Нижче представлені графіки залежностей втрат напору (рис. 1) та ефекту знезалізнення (рис. 2) від часу за отриманою моделлю та експериментальними даними для порівняння.

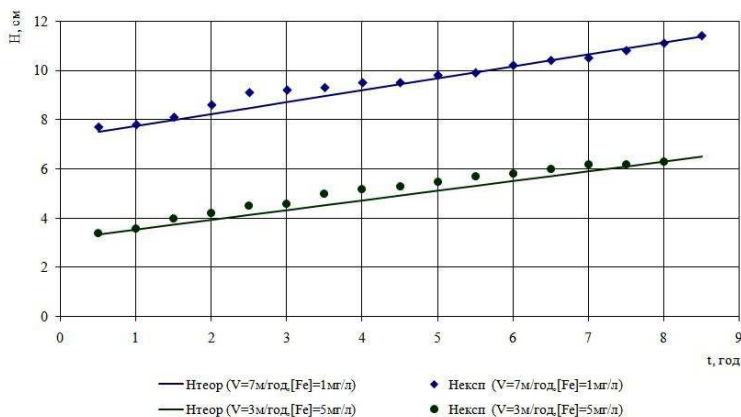


Рис. 1. Графік залежностей втрат напору від часу

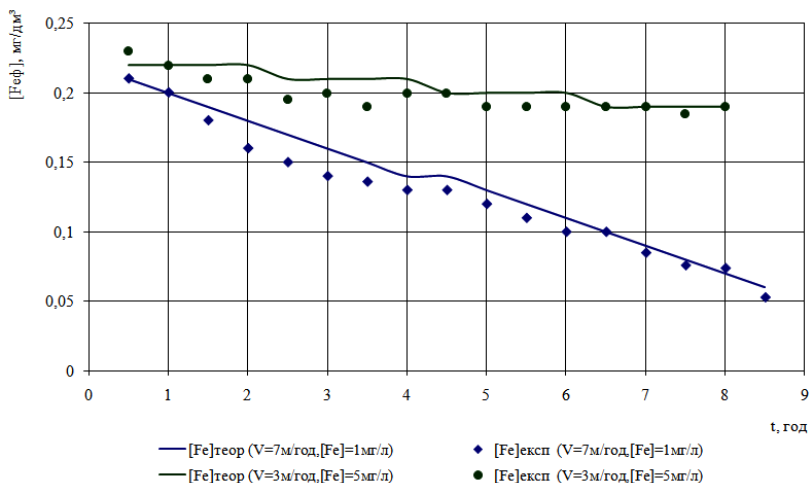


Рис. 2. Графік залежностей ефекту знезалізнення від часу

З рис. 1 видно, що теоретичні дані відрізняються від експериментальних з незначною похибкою, максимальна похибка становить 8,16%, а середня дорівнює 3,64%. На рис. 2 середня похибка між теоретичними та експериментальними даними становить 5,67%.

Із врахуванням всіх коефіцієнтів, які суттєво впливають на математичну модель оптимізації втрат напору, її можна записати у наступному вигляді:

$$y = 10,06 + 5,4 \cdot V + 3,14 \cdot [Fe] + 3,71 \cdot t + 2,88 \cdot V \cdot [Fe] + 2,3 \cdot V \cdot t + 2,14 \cdot [Fe] \cdot t + 2,18 \cdot V \cdot [Fe] \cdot t \quad (9)$$

Із врахуванням всіх коефіцієнтів, які суттєво впливають на математичну модель оптимізації ефекту знезалізнення, її можна записати у наступному вигляді:

$$y = 0,214 + 0,08 \cdot V + 0,114 \cdot [Fe] - 0,015 \cdot t + 0,045 \cdot V \cdot [Fe] + 0,021 \cdot V \cdot t + 0,045 \cdot [Fe] \cdot t + 0,026 \cdot V \cdot [Fe] \cdot t \quad (10)$$

**Отже, дані рівняння** регресії можна використовувати для прогнозування зміни втрат напору та ефекту знезалізнення напірних пінопілістирольних фільтрів із вхідною концентрацією заліза від 1...5 мг/дм<sup>3</sup>, швидкістю фільтрування 3...7 м/год, при контактному знезалізненні води.

1. Орлов В. О. Водопостачання та водовідведення. Підручник / В. О. Орлов, Я. А. Тугай, А. М. Орлова. – К. : Знання, 2011. – 359 с.
2. Технический справочник по обработке воды. В 2 т. Т.1.: пер. с фр. – СПб. : Новый журнал, 2007.
3. Орлов В. О. Знезалізнення підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням. Монографія / В. О. Орлов. – Рівне : НУВГП, 2008. – 158 с.
4. ДБН В.2.5-74:2013 “Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування”. – К. : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013.
5. Пат. 91986 Україна. МПК В 01 D 24/00, С 02 F 1/64. Напірна установка для знезалізнення підземних вод / В. О. Орлов, С. Ю. Мартинов, К. С. Корнійчук: заявник та патентовласник Національний університет водного господарства та природокористування. – № у 2014 01556; заявл. 17.02.2014, опубл. 25.07.2014, Бюл. № 14.
6. Полистирол. Физико-химические основы получения и переработки / А. Я. Малкин, С. А. Вольфсон, В. Н. Кулезнев, Г. И. Файдель. – М. : Химия, 1975. – 288 с.
7. Орлов В. О. Пінополістирольні фільтри в технологічних схемах водопідготовки / В. О. Орлов, А. М. Зошук, С. Ю. Мартинов. – Рівне : РДТУ, 1999. – 143 с.
8. Орлов В. О. Водоочисні фільтри із зернистою засипкою. – Рівне : НУВГП, 2005. – 163 с.
9. Конопленко Е. И. Планирование эксперимента: методические указания / Е. И. Конопленко, Н. К. Хореева, А. П. Лапусь. – М. : МГУПП, 2011. – 44 с.

Рецензент: д.т.н., професор Орлов В. О. (НУВГП)

---

**Korniychuk C. S., Post-graduate Student** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

## **MODELING OF PRESSURE FILTER WITH FOAM FILLING IN THE CONTACT IRON REMOVAL WATER**

**The resulted results of research deferrization groundwater on filter with polystyrene backfilling under pressure filtration mode.**

**Keywords: pin iron removal, pressure filter, pressure loss, the regression equation.**

---

**Корнійчук Е. С., аспірант** (Національний університет водного господарства и природопользования, г. Ровно)

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НАПОРНОГО ФИЛЬТРА С ПЕНОПОЛИСТИРОЛЬНОЙ ЗАСЫПКОЙ ПРИ КОНТАКТНОМ**



## **ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИИ ВОДЫ**

**Приведены результаты лабораторных исследований обезжелезивания подземных вод на фильтрах с пенополистирольной загрузкой при напорном режиме фильтрования.**

***Ключевые слова:* контактное обезжелезивания, напорный фильтр, потери напора, уравнение регрессии.**

---