

УДК 628.14

**Орлов В. О., д.т.н., проф., Мартинов С. Ю., к.т.н., доцент,  
Куницький С. О., к.т.н.** (Національний університет водного  
господарства та природокористування, м. Рівне)

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТНОГО ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ДЛЯ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

**В статті описаний процес контактного знезалізнення води з подальшим його математичним моделюванням. Розроблена математична модель фільтрування на зернистих фільтрах, що включає рівняння матеріального балансу, кінетику протікання процесів та зміну втрат напору в засипці. На основі математичної моделі можна визначити потрібну висоту шару засипки, її структурні показники (мінімальний, максимальний, еквівалентний діаметри, коефіцієнт форми зерна, поруватість), швидкість фільтрування, температуру води.**

**Ключові слова:** математична модель, фільтрування, кінетика процесу, пористе середовище, втрати напору, контактне знезалізнення води, швидкість фільтрування, осад, каталітична плівка, висхідне фільтрування, пористість засипки, пінополістирол.

**Постановка проблеми статті.** Питання охорони навколишнього середовища і раціонального використання прісної води посідає чільне місце у програмах економічного і соціального розвитку всіх без винятку країн світу. Особливе значення це питання має для України, яка за ступенем водозабезпечення займає одне з останніх місць серед країн Європи, а за водоємністю валового суспільного продукту випереджає їх [6; 9].

Кліматичні зміни протягом останнього десятиліття проявляються в наростанні теплозабезпеченості та посушливості значних територій. Найбільше це проявляється в субтропічних широтах. Але, ось уже останні три роки на території України в межах помірною поясу почали проявлятися явища посушливості. Спекотний період збільшився в часових рамках, а кількість опадів значно скоротилася. Це призводить до дефіциту води й пошуку нових джерел її видобутку [4; 8].

Дефіцит води та погіршення її якості проявляється у вигляді складної науково-технічної проблеми. Вирішення проблеми забезпе-

чення населення питною водою нормативної якості можливе лише шляхом впровадження сучасних технологій, споруд, реагентів, матеріалів та обладнання [3].

**Головною метою даної статті є** представлення математичної моделі, яка дає змогу змодельовати процес контактного знезалізнення води та визначити параметри фільтрування й засипки.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Все більш актуальним постає питання вдосконалення існуючих технологій та споруд для водопідготовки і розроблення нових ефективних ресурсозаощаджуючих методів очищення природних вод від забруднень. Основними критеріями при підготовці води споживачам є ресурсозаощадження та економічна складова процесу [4-9].

Характер і обсяг заходів щодо очищення води повинні вибиратися за результатами зіставлення якісних характеристик води даного джерела з тими вимогами, які ставлять споживачі до якості води. При виборі методу та компонування водоочисних споруд керуються вимогами до якості господарсько-питної води, що лімітуються Державними санітарними правилами і нормами (ДержСанПіН) «Вода питна, гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання» 2010 року [1-3].

Метод водопідготовки вибирається на основі вивчення показників якості води водного джерела, які отримані в результаті проведення фізико-хімічних, санітарно-бактеріологічних і технологічних аналізів, потрібного ступеня знезалізнення, продуктивності станції.

Для вибору методу знезалізнення необхідно встановити при яких умовах залізо може бути видалене із водного розчину і, в першу чергу, умови переходу закисного і окисного заліза із розчиненого стану в осад [9].

Підготовка підземних вод до нормативної якості забезпечується на водоочисних станціях, на яких досить ефективно себе зарекомендували пінополістирольні фільтри при контактному знезалізненні води. Перевагами таких фільтрів є малогабаритність та економічність конструкції, а також високий ступінь очищення підземних вод [8; 10].

. На стадії проектування станцій знезалізнення постає задача запроектувати технологічні та конструктивні параметри фільтрів та їх комунікацій. В кожному конкретному випадку технологія контактного знезалізнення потребує уточнення, залежно від фізико-хімічних показників води природної води джерела, з якого здійснюється забір.

**Постановка завдання.** Розробити математичну модель, яка буде враховувати основні параметри фізико-хімічного процесу контактного знезалізнення води.

**Основні результати дослідження.** *Контактне знезалізнення* – це процес знезалізнення води спрощеною аерацією та фільтруванням в об'ємі пористих середовищ при високих значеннях рН та лужності, що передбачає подачу аерованої води відразу на фільтри без попереднього її відстоювання [5; 8].

Важливим критерієм при проектуванні водоочисних споруд є тип фільтрів і вид засипки для них. Параметри фільтруючої засипки суттєво впливають на ефективність процесу знезалізнення води. В якості фільтруючих засипок доцільно використовувати пісок, шлак, туфи, гравій, цеоліт, аглопорит, пінополістирол та інші [4; 6].

На кафедрі водопостачання та бурової справи Національного університету водного господарства та природокористування досвід проектування та використання фільтрів із зернистих матеріалів перевищує 50 років. Фільтри, запроектовані під керівництвом професора Орлова В.О., експлуатуються на об'єктах Київської, Хмельницької, Вінницької, Житомирської та Рівненської областей [8].

Найвідомішими способами виготовлення пінополістирольної засипки є обробка товарного полістиролу паром, гарячим повітрям або гарячою водою. Слід зауважити, що процес спінення пінополістиролу складний, існує проблема по виготовленню пінополістирольної засипки потрібного діаметру [4].

На підприємствах із виготовлення пінополістирольних плит було налагоджено виробництво засипки з підвищеною крупністю гранул. Крупногранульована засипка є дешевшою та простішою в отриманні, ніж спінена на замовлення. Виготовлення такої засипки проводять у виробничих умовах на підприємствах по виготовленню теплоізолюючих пінополістирольних плит [5; 7; 8; 10].

Науковцями кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи Національного університету водного господарства та природокористування розроблено математичну модель фільтрування на зернистих фільтрах. Було встановлено, що модель повинна враховувати рівняння матеріального балансу, кінетику протікання процесів та враховувати зміну порового середовища з визначенням втрат напору в ньому [4; 9].

Процес адсорбції заліза на поверхні каталізатора (осаду та зерен) проходить значно швидше ніж окиснення заліза та утворення нових порцій каталізатора. Тому, рівняння балансу для кінетично ко-

нтрольованого процесу можна записати наступним чином:

$$V(t) \cdot \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} + \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

де  $V(t)$  – швидкість фільтрування, м/год;

$C(x,t)$  – концентрація заліза, г/м<sup>3</sup>;

$x$  – координата по висоті шару с, м;

$\rho(x,t)$  – густина осаду в шарі засипки, г/м<sup>3</sup>;

$t$  – час фільтрування, год.

При моделюванні роботи незалізнювальних фільтрів обов'язково повинна враховуватися змінна витрата води (швидкість фільтрування), що пов'язано з використанням багатозонних тарифів на електроенергію, насосів з частотним регулюванням, з особливостями сумісної роботи фільтрів та напірно-регулювальних споруд в сільських системах водопостачання тощо [6].

При контактному незалізненні води рівняння кінетики можна записати в такому вигляді:

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial x} = -b(x,t) \cdot C(x,t) + a(x,t) \cdot \rho(x,t), \quad (2)$$

де  $a(x,t)$ ,  $b(x,t)$  – параметри фільтрування, що визначають інтенсивність відриву та прилипання частинок і залежать від умов фільтрування, м<sup>-1</sup>.

Для контактного незалізнення параметр  $b$  пропонується визначати за формулою

$$b = \varphi \cdot \beta \cdot V^{\varepsilon_3} \cdot d^{\varepsilon_4}, \quad (3)$$

де  $\beta$ ,  $\varepsilon_3$ ,  $\varepsilon_4$  – коефіцієнти;

$\varphi$  – коефіцієнт, що враховує каталітичний вплив осаду і залежить від площі каталітичної плівки.

Для контактного незалізнення води параметр  $\beta$  можна визначати за формулою

$$\beta = \frac{6 \cdot \alpha \cdot k_0 \cdot \psi \cdot (1-m) \cdot [O_2]}{10^{-2pH}}, \quad (4)$$

де  $k_0$  – коефіцієнт, що характеризує каталітичні властивості;

$[O_2]$  – концентрація розчиненого кисню, мг/дм<sup>3</sup>;

$\psi$  – коефіцієнт, що враховує співвідношення закисної форми заліза до загального  $[Fe^{2+}] / [Fe^{3Al}]$ ;

$m$  – поруватість засипки;

$\rho H$  – водневий показник.

Рівняння (4) опосередковано враховує вплив осаду в міжпоровому просторі засипки, кількість якого з часом фільтрування збільшується, що призводить до зменшення поруватості, збільшення множника  $(1 - m)$  та коефіцієнта  $\beta$ .

Втрати напору в зернистому шарі залежать від багатьох факторів: висоти шару засипки, структурних показників засипки (мінімального, максимального, еквівалентного діаметрів, коефіцієнта форми зерна, поруватості), швидкості фільтрування, температури (в'язкості) води, кількості, характеру та розподілу по висоті засипки забруднень, тощо [4; 6; 7]. Втрати напору в шарі засипки можуть визначатися через коефіцієнт фільтрації або гідравлічний похил.

Для врахування зміни поруватості засипки при фільтруванні води використовується наступна формула:

$$m(x, t) = m_0(x) - \rho(x, t) / \gamma, \quad (5)$$

де  $m_0$  – поруватість «чистої» засипки;

$\gamma$  – масова концентрація твердих частинок в одиниці об'єму осаду, г/м<sup>3</sup>.

Втрати напору в пінополістирольній засипці можуть бути розраховані за формулою:

$$H_3(t) = \int_{x=0}^{x=L} I(x, t) \cdot d(x), \quad (6)$$

де  $I(x, t)$  – гідравлічний похил;

$L$  – висота всієї засипки, м.

Математична модель розв'язується чисельним методом при наступних початкових та граничних умовах:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 &\rightarrow C = C_0; \text{ при } t = 0 \rightarrow \rho = \rho_0(x); \\ \text{при } x = L &\rightarrow C \leq C_{\text{ДОП}}; \text{ при } t = t_\phi \rightarrow H_3 \leq H_{\text{ДОП}}; \\ \text{при } t &\rightarrow \infty \rightarrow \partial C / \partial x = 0, C = C_0, \rho = \rho_{\text{гр}}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $C_{\text{ДОП}}$  – гранично допустима концентрація загального заліза у фільтраті, мг/дм<sup>3</sup>. Для питної води не повинна перевищувати 0,2 мг/дм<sup>3</sup> [1];

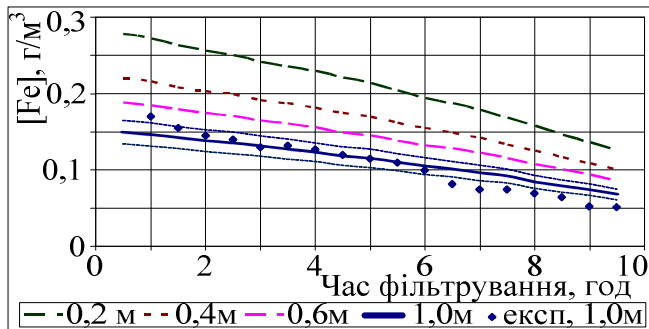
$t_\phi$  – нормативна тривалість фільтрування. Згідно [2] тривалість фільтроциклу не повинна перевищувати 2 доби;

$H_{\text{ДОП}}$  – максимально допустимі втрати напору в пінополістиро-

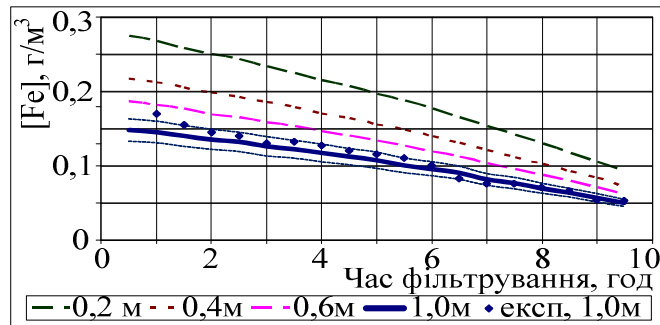
льній засипці. Згідно [3], втрати напору в пінополістирольних фільтрах з висхідним фільтруванням рекомендується приймати 2,0...2,5 м;

$\rho_{гр}$  – граничне насичення порового простору затриманою зависю, г/м<sup>3</sup>.

Перевірка адекватності моделі проводилася шляхом порівняння значень розрахованих за моделлю з експериментальними, які отримані в лабораторних та натурних умовах на діючих станціях знезалізнення води. Так, на рисунку наведено залежності зміни концентрації заліза в шарах засипки з часом фільтрування та врахуванням відриву (рисунок, а) й без врахування відриву (рисунок, б) частинок.



а)



б)

Рисунок. Зміна концентрації заліза в шарах засипки з часом фільтрування: а) з врахування відриву; б) без врахування відриву частинок

Ефективність знезалізнення води зростає впродовж всього процесу фільтрування, що пов'язано з накопиченням каталітичного осаду в міжпоровому просторі засипки. Проте на рисунку б очевидне більше співпадання експериментальних та теоретичних даних, що може свідчити про практичну відсутність відриву частинок при контактному знезалізненні води.

**Висновок.** Запропонована технологія контактного знезалізнен-

ня води на пінополістирольних фільтрах дозволяє забезпечувати ефективну підготовку питної води, запропонована математична модель достатньо повно описує процес очищення підземних вод від сполук заліза та сірководню.

1. Держсанпін «Вода питна, гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання» – 2010 рік. 2. «Правила технічної експлуатації систем водопостачання та водовідведення України» – Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України № 302 від 27.11.2015. 3. ДБН В.2.5 – 74:2013 Водопостачання: зовнішні мережі та споруди. – Київ, 2013 р. 4. Знезалізнення підземних вод спрощеною аерацією та фільтруванням. Монографія / Орлов В. О. та ін. – Рівне : НУВГП, 2008. – 158 с. 5. Куницький С. О. Обґрунтування параметрів роботи пінополістирольних фільтрів з підвищеною крупністю гранул при контактному знезалізненні підземних вод: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / С. О. Куницький. – Рівне, 2013. – 26 с. 6. Очищення природної води на пінополістирольних фільтрах / В. О. Орлов, С. Ю. Мартинов, А. М. Орлова, В. О. Зошук, Н. Л. Мінаєва, С. О. Куницький та ін.; за заг. ред. В. О. Орлова. – Рівне : НУВГП, 2012. – 172 с.: іл. 7. Орлов В. О. Дослідження процесу знезалізнення підземної води на зернистих фільтрах з підвищеною крупністю гранул / В. О. Орлов, С. Ю. Мартинов, С. О. Куницький, М. М. Меддур // Вісник НУВГП: Збірник наукових праць. – Рівне : НУВГП, 2012. – Випуск 4(60). – 268 с. 8. Куницький С. О. Математичне моделювання технологічних режимів фільтрування та промивання фільтрів у процесі контактного знезалізнення підземних вод / С. О. Куницький, М. М. Меддур // Щомісячний науковий журнал «Молодий вчений». – № 8(11). Частина 1. – 2014. – С. 23–27. 9. Орлов В. О. Контактное обезжелезивание вод на пенополистирольных фильтрах. / В. О. Орлов, С. Ю. Мартинов. – LAP LAMBERT Academic Publisher ist ein., 2015 г. – 130 с. 10. Орлов В. О. Дослідження контактного знезалізнення на пінополістирольних фільтрах / В. О. Орлов, М. М. Меддур, В. В. Куницький, С. В. Гаврилук // Вісник ОДАБА. – 2013. – Одеса. – Вип. 50. Ч 2. – С. 132–136.

Рецензент: д.т.н., професор Ковальчук В. А. (НУВГП)

---

**Orlov V. O., Doctor of Engineering, Professor, Martynov S. Y.,  
Candidate of Engineering, Associate Professor, Kunytskyi S. O.,  
Candidate of Engineering** (National University of Water and  
Environmental Engineering, Rivne)

**MATHEMATIC MODELING OF UNDERGROUND WATER DEIRONING  
PROCESS FOR DRINKING WATER SUPPLY**

**This article describes how to contact de-ironing of water followed by its mathematical modeling. A mathematical model of filtering grained filters, including mass balance equation, the kinetics of processes and changes in the pressure in the load losses. On the basis of a mathematical model can determine the desired height of the load layer, its structural indicators (minimum, maximum, equivalent diameter, the ratio of grain shape, porosity), filtration speed, water temperature.**

**Keywords:** mathematical model, filtration, process kinetics, porous medium, head loss, contact de-ironing of water, filtration rate, the precipitate, the catalyst film, the upward filtering, load the porosity of expanded polystyrene.

---

**Орлов В. О., д.т.н., проф., Мартынов С. Ю., к.т.н., доц.,  
Куницкий С. О., к.т.н. (Национальный университет водного  
хозяйства и природопользования, г. Ровно)**

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ДЛЯ ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

**В статье описан процесс контактного обезжелезивания воды с последующим его математическим моделированием. Разработана математическая модель фильтрации на зернистых фильтрах, включая уравнение материального баланса, кинетику протекания процессов и изменение потерь напора в загрузке. На основе математической модели можно определить нужную высоту слоя загрузки, ее структурные показатели (минимальный, максимальный эквивалентный диаметры, коэффициент формы зерна, пористость), скорость фильтрования, температуру воды.**

**Ключевые слова:** математическая модель, фильтрование, кинетика процесса, пористая среда, потери напора, контактное обезжелезивания воды, скорость фильтрования, осадок, каталитическая пленка, восходящее фильтрование, пористость загрузки, пенополистирол.

---