

УДК 658.567.1

## МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ ГОРИЗОНТІВ ПІД ЧАС ДОВГОТРИВАЛОГО ЗБЕРІГАННЯ ВІДХОДІВ ГАЛЬВАНІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

Третякова Л.Д.<sup>1</sup>, д.т.н., проф.; Мітюк Л.О.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.;  
Прокопенко І.Д.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

**Вступ.** На підприємствах військово-промислового комплексу, машинобудування, електронної техніки України використовують гальванічний (електрохімічний) спосіб нанесення різноманітних покриттів: хромованих, мідних, нікельованих, оцинкованих. У процесах оброблення поверхонь для надання їм антикорозійних і декоративних властивостей використовують різноманітні реагенти, до складу яких входять важкі метали. Підприємства, у складі яких функціонують гальванічні цехи, є основними джерелами потрапляння токсичних важких металів у ґрунт і водні горизонти.

**Постановка проблеми і огляд літературних джерел.** Проблеми забруднення ґрунтів та водних ресурсів є домінуючими в питаннях екологічної безпеки. Забруднення важкими металами підземних вод є однією з екологічних проблем через його вплив на здоров'я людей [1]. Особливу небезпеку становлять важкі метали, які потрапляють у воду та поглинаються фітопланктоном, що може призвести у подальшому до потрапляння їх у їжу людини. Водопостачання у всьому світі стикається з серйозними проблемами через підвищення концентрацій важких металів [2].

Гальванічне виробництво належить до найбільш матеріаломістких, в якому обсяги сировини і допоміжних матеріалів у декілька разів перевищує вихід готової продукції. Як наслідок, в результаті виробництва утворюються відходи: електроліти та травильні розчини різного складу. Під час змішування з водою у ході очищення, електроліти та травильні розчини потрапляють у стічні води. Сухі відходи (шлам) утворюється під час очищення стічних вод. Найбільш небезпечними складниками шламу є оксиди важких металів (мідь, залізо, хром, нікель, цинк, свинець, олово) [3]. Довготривале складування відходів гальванічного виробництва дозволено на спеціальних майданчиках в обладнаних сховищах. Однак, як показує практика, штучні сховища мають обмежену місткість та терміни використання. Нині шлам зберігають на відкритих майданчиках із застосуванням захисних упакувань. Тверді відходи під впливом опадів, особливо кислотних дощів, переходять в рідкий стан. Такі явища призводять до витоку хімічно-активних елементів у ґрунт. У результаті виникають забруднення важкими металами не тільки прилеглих до місць складування ґрунтових покривів і поверхневих вод, а й підземних водних горизонтів. Забруднення поверхні ґрунтів призводить до низки проблеми, пов'язаних із засолення ґрунту, забрудненням ґрунтових вод та підвищенням рівня мінералізації води в поверхневих водоймах. Безвідповідальне ставлення до розміщення промислових відходів спричинило повне забруднення 6 % і часткове забруднення 25 % розвіданих запасів підземних вод [4].

Забруднення ґрунтів, поверхневих і ґрунтових вод оцінюють різними фізико-хімічними методами за групою параметрів, на підставі великих масивів експе-

риментальних даних [5]. Їх реалізація потребує отримання великих обсягів інформації, тривалих лабораторних випробувань, наявності коштовного спеціального обладнання, спеціальних комп'ютерних пакетів програм.

Вищенаведена інформація робить актуальним розробку методу прогнозування рівнів можливого забруднення ґрунтів та підземних вод з використанням математичних моделей для отримання швидких та інформативних рішень. Метою статті є розробка методу і математичної моделі для прогнозування виникнення забруднення водних горизонтів важкими металами під час довготривалого зберігання гальванічного шламу на відкритих ділянках.

**Матеріали та методи.** Автори виконали експериментальні дослідження процесу накопичення шламу на території підприємства у ході роботи ліній «травлення міді» під час виготовлення чипів. Процес «травлення міді» використовують для створення та закріплення малюнків на поверхнях мікросхем. Оброблення окремих деталей супроводжується використанням великої кількості води і відповідно утворенням відходів. Відпрацьовані технологічні розчини хімічного та електрохімічного знежирення, а також лужні стічні води після каскадного промивання потрапляють у стоки. Технологічні процеси в цехах гальваніки призводять до утворення рідких відходів з металами в процесі травлення та твердих відходів (шламу) – під час утилізації. У попередні роки шлам зберігали на території підприємства у звалищах на відкритих ділянках. Останні 20 років шлам зберігають в упакуваннях з полівінілхлорид-пластикату. Негативним наслідком від такого поширення хімічно-небезпечних речовин є забруднення території складування на підприємстві та імовірність забруднення прилеглих територій сільськогосподарського призначення.

Запропоновано метод прогнозування забруднення ґрунтів на території складування шламу під час моделювання процесу руху солей від поверхні землі в нижче розташовані шари зони [6]. Ґрунти в районі підприємства мають таку структуру: суглинок – (1.5...1.8) м; пісок – (1.8...2.2) м; ґрунтові води – (2.6...3.0) м; глина – (3.8...4.5) м; далі починається міжшарова вода. Методика досліджень базується на використанні теорії фізико-хімічної гідродинаміки пористих середовищ. Процес руху солей металів можна описати диференціальним рівнянням руху і збереження маси речовини для вертикального перенесення маси речовини. Наявність на поверхні ґрунту шламу відповідає граничній умові першого роду.

$$D \frac{d^2 C}{dX^2} = \theta \frac{dC}{dT}, \quad (1)$$

де  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C$  – засоленість ґрунту (порід), %;  $\theta$  – об'ємна вологість, %;  $X$  – просторова координата, м;  $T$  – часова координата, с. Аналітичне вирішення рівняння (1) має вигляд:

$$C_{hx} = (C_s - C_0) \operatorname{erfc} \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{h_x}{\sqrt{\frac{D \cdot t}{\theta}}} \right], \quad (2)$$

де  $C_{hx}$  – прогнозний рівень засоленості на глибині  $h_x$ , %;  $C_s$  – поверхнева засоленість зони аерації в точках поверхні ( $x_0, y_0, z_0$ ) при  $h = 0$ ;  $C_0$  – початковий рівень засоленості в точках поверхні ( $x_0, y_0, z_0$ ) ґрунту до початку складування при  $t = 0$ ;  $h_x$  – відстань розрахункових точок від точок поверхні ( $x_0, y_0, z_0$ ), тобто від поверхні землі, м;  $t$  – термін прогнозного розрахунку, рік;  $\operatorname{erfc}$  – табульована функція.

Коефіцієнт молекулярної дифузії  $D$  характеризує переміщення іонів металу в наслідок теплового руху в ґрунті і залежить від властивостей молекул металів, температури та тиску, але головним чином визначається концентрацією речовини та вологістю. Для України вологоперенесення в зоні аерації за відносної сталості природних та техногенних джерел надходження води та солей, характерна часова повторюваність водно-солевого режиму, близька до річної. Явної залежності коливань коефіцієнта молекулярної дифузії  $D$  від сезону не спостерігається [7]. Об'ємна вологість  $\theta$  визначається вмістом вологи у ґрунті і залежить від механічних властивостей ґрунту, пористості, капілярності, вмісту гумусу.

#### **Результати та їх обговорення.**

Проникнення важких металів та рівнів засоленості ґрунту визначено за таких постановок задачі:

1. Складування та зберігання шламів на відкритій ділянці впродовж двадцяти років;
2. Складування шламів та зберігання в упакованнях на відкритій ділянці впродовж двадцяти років.

У ході прогнозування прийняті такі допущення: умова формування області використання математичної моделі – наявність у поверхневому шарі ґрунту хімічно-небезпечних речовин, рівень яких перевищує гранично-допустиму концентрацію; поширення важких металів у глибину ґрунту призводить до його засолення; процес накопичення металів є кумулятивний; не враховано щорічні сезонні зміни вологості ґрунту. За розрахунковий період прийнято один рік (365 днів). Загальний час прогнозування становить 20 років. Прогнозування з якісними та кількісними показниками реалізовано з використанням прикладного забезпечення Microsoft Excel.

За першої постановки задачі виконано прогнозування глибини проникнення важких металів у зону аерації на наступні 20 років. Розрахунки показали, що відбувається щорічне збільшення глибини проникнення важких металів і після 10...12 років може виникнути загроза потраплянням шкідливих речовин у ґрунтові води, оскільки елементи важких металів знаходяться на глибині, яка перевищує 1,6 м. Після 20 років глибина проникнення елементів важких металів становить більш як 2,7 м.

Довгостроковий прогноз забруднення ґрунтів під час зберігання шламу в упакованні з полівінілхлорид-пластикату на відкритій ділянці, отримано як результат ітераційного розрахунку за запропонованим алгоритмом за формулою (2) Як впливає з розрахунків під час зберігання шламу в упакованні засоленість на поверхні зменшується порівняно з першою постановкою та процес проникнення важких металів на глибину уповільнюється. Через 10 років глибина проникнення елементів важких металів становила до 0,6 м. Однак під час збереження упакування на відкритих ділянках відбувається поступове їх руйнування. Шви під впливом механічних навантажень, змінення зовнішніх температур, ультрафіолетового опромінення та опадів розтріскуються, що призводить до утворення постійного шару шламу на ділянках для зберігання. Такий процес спричиняє через 10...15 років рівні забруднення аналогічні за умов відкритого зберігання.

#### **Висновки.**

У статті запропоновано метод прогнозування забруднення ґрунту та водних горизонтів сполуками важких металів у разі їх зберігання на відкритих ділянках. Аналіз літературних джерел засвідчив, що потрапляння важких металів у ґрунт призводить до негативних екологічних наслідків, які створюють небезпеки

для населення та довкілля. Проникнення солей важких металів призводить до глибинного засолення ґрунту, втрати його родючості, до вторинного забруднення рослин, які повсюдно використовують в їжу, до забруднення поверхневих та глибинних шарів водних горизонтів, які часто використовують як джерела питної води.

За результатами розрахунків, які отримано за запропонованим методом, встановлено:

– зберігання шламу на відкритих ділянках спричиняє два види небезпек: глибинне засолення ґрунту та забруднення підземних водних горизонтів важкими металами;

– під час розміщення та зберігання шламу на відкритій ділянці без упакувань упродовж десяти років, проникнення елементів важких металів досягає глибини 1,6 метрів, що створює небезпеку їх потрапляння у водні горизонти. Використання упакувань уповільнює процес, однак після десяти років зберігання через їх часткове руйнування створюють умови для забруднення.

Впровадження ефективних методів очищення стічних вод, вторинної переробки шламу та досконаліх умов зберігання відходів дає можливість запобігти забрудненню та підвищенню засоленості ґрунту не тільки на робочих площадках але на прилеглих територіях, які часто мають сільськогосподарське значення. Створення умов до унеможливлення виникнення забруднення поверхневих і підземних вод, яке призводить до виникнення техногенних надзвичайних ситуацій, дає можливість запобігти витрачання великих матеріальних і фінансових ресурсів, які можливо скерувати на практичну реалізацію науково-технічних розробок щодо утилізації вторинного використання відходів промислових виробництв, а також на регенерацію та відновлення земельних та водних природних ресурсів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Elumalai, V., Brindha, K., & Lakshmanan, E. Human Exposure Risk Assessment Due to Heavy Metals in Groundwater by Pollution Index and Multivariate Statistical Methods. A Case Study from South Africa. *Water Journal*, 2017, 9, 234. doi: 10.3390/w9040234.
2. Razak, N.H.A., Praveena, S.M., Aris, A.Z., Hashim, Z. Drinking water studies: A review on heavy metal, application of biomarker and health risk assessment (a special focus in Malaysia). *J. Epidemiol. Global Health*, 2015, 5, 297–310. doi: 10.1016/j.jegh.2015.04.003.
3. Ali H. Khan E. Trophic Transfer, Bioaccumulation and Biomagnification of Non-Essential Hazardous Heavy Metals and Metalloids in Food Chains. *Concepts and Implications for Wildlife and Human Health. Human and Ecological Risk Assessment*. 2018. 25. P. 1353-1376. URL: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>.
4. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2020 році. URL: <https://mepr.gov.ua/news/38840.html>
5. Chen Y., Yuan L., Xu C. The Accumulation Characteristics and Potential Health Risks of Heavy Metals in Vegetables from Reclaimed Area of China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*. 2018. 24. P. 949-960. URL: <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1403281>.
6. Nester A.A., Tretiakova L, Mitiuk L, Prakhovnik N, Husiev A. Remediation of Soil Containing Sludge Generated by Printed Circuit Board Production and Electroplating. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. 2020. Vol. 76. No. 4. P. 68–75. doi: 10.5755/j01.arem.76.4.25460