

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД ГАЛЬВАНІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

Леся Василенко¹, Олексій Василенко², Станіслав Федоренко³,
Юлія Березницька⁴

^{1,2,3,4} Київський національний університет будівництва і архітектури
31, Повітрофлотський пр., м. Київ, Україна, 03037

¹ канд. техн. наук, доцент, lesya.kiev@ukr.net, orcid.org//0000-0001-5289-3830

² канд. техн. наук, професор, vasylenko.oa@knuba.edu.ua, orcid.org//0000-0003-2105-5951

³ fsv1972@i.ua, orcid.org/0000-0003-0577-0509

⁴ канд. техн. наук, juli_mmm@ukr.net, orcid.org//0000-0001-7953-3974

DOI:10.32347/2524-0021.2020.34.4-11

Анотація. Серед проблем охорони навколишнього середовища важливе місце займає вирішення питань, направлених на мінімізацію забруднення природних об'єктів. Забруднення небезпечними хімічними речовинами навколишнього середовища (поверхневих водних об'єктів, атмосферного повітря, ґрунту) негативно впливає на стан біосфери та на здоров'я населення. Інтенсивний розвиток промисловості, сільського господарства, інфраструктури та інших галузей безпосередньо впливають на навколишнє середовище. Гальванічні виробництва є розповсюдженою складовою частиною у багатьох галузях промисловості. У свою чергу викиди гальванічних виробництв призводять до екологічних та економічних збитків. Одним із питань, які і досі потребують вирішення, є знешкодження відходів від таких виробництв. У водойми важкі метали потрапляють з недостатньо очищеними стічними водами та поверхневим стоком з підприємств, на яких використовується гальванічне покриття поверхонь металевих виробів або там, де використовуються фарбники. Такий метод очищення стічних вод від іонів важких металів як гальванокоагуляція знаходить широке застосування при очищенні промивних вод, які є відходами від процесу нанесення гальванічних покриттів. В даній статті була розроблена та запропонована математична модель процесу очищення стічних вод від іонів важких металів за допомогою гальванокоагуляції на основі проведених досліджень та аналізу існуючих процесів. В результаті розв'язку поставленої математичної задачі було отримано формули для розрахунку робочої висоти фільтру при достатній кількості іонів магнію. Також наведено висновки щодо шляхів скорочення негативного впливу гальванічних виробництв на складові навколишнього середовища. Завдяки використанню системного підходу, організаційних та технічних рішень, забезпечиться ефективна очистка стічних вод від лімітуючих забруднень та зменшиться кількість відходів виробництва.

Ключові слова: іони важких металів; забруднення; навколишнє середовище; гальванічне виробництво; стічні води.

©Василенко Л.О., Василенко О.А.,
Федоренко С.В., Березницька Ю.О., 2020

ВСТУП

Вода є основою життя і відіграє виняткову роль в природних та соціально-економічних процесах. Усе це зумовлює постійний контроль за рядом гідрологічних показників, складових водного балансу, режиму річкового стоку під впливом господарської діяльності людини.

Забруднення небезпечними хімічними речовинами навколишнього середовища (поверхневих водних об'єктів, атмосферного повітря, ґрунту) негативно впливає на стан біосфери та на здоров'я населення. Тому, серед проблем охорони навколишнього середовища важливе місце займає вирішення питань, направлених на мінімізацію забруднення природних об'єктів [1, 2, 10, 16, 17].

Інтенсивний розвиток промисловості, сільського господарства, інфраструктури та інших галузей безпосередньо впливають на навколишнє середовище. Гальванічні виробництва не є виключенням, адже процеси обробки металевих та неметалевих поверхонь виробів пов'язані з використанням великої кількості хімічних речовин, в тому числі кислот, солей важких та кольорових металів, різноманітних органічних сполук. Різноманітність номенклатури хімічних речовин пов'язана з різноманітністю задач, котрі вирішуються за допомогою гальванічної обробки.

Технологія дозволяє надати металовиробу декоративного вигляду, попередити зміну властивостей поверхні (наприклад, для підвищення електропровідності, підвищення твердості, зносостійкості, покращення адгезійних властивостей поверхні та ін.) [3, 11, 18].

Гальванічні виробництва є практично на кожному машинобудівельному виробництві, та на багатьох виробництвах інших галузей промисловості, включаючи приладобудування, електроніку, виробництво засобів зв'язку та багатьох інших. Викид у навколишнє середовище відходів гальванічних виробництв веде до екологічних та економічних збитків. Досить часто такі виробництва представляють

собой невеликі, технологічно малоефективні цехи та ділянки, як правило, не обладнані сучасним обладнанням для нанесення покриття. Також не вирішене питання і знешкодження відходів. Існує ряд підприємств на яких не достатньо здійснюються заходи щодо очищення промислових стічних вод, про що свідчить перевищення норм ГДК у стічних водах, які скидаються у мережі.

МЕТА І МЕТОДИ

Внаслідок функціонування гальванічних ліній можливе забруднення приземного шару атмосфери хімічними речовинами, які утворюються в процесі підготовки деталей та нанесення гальванічного покриття. Для оцінки можливих наслідків для навколишнього природного середовища був проведений аналіз вмісту забруднюючих речовин в районах розташування виробництв. В атмосферному повітрі було виявлено: пил, хром (шестивалентний), аміак, діоксид азоту [5, 6, 12, 13, 19, 20, 21].

Гальванічні стоки це, насамперед, важкі метали та їх сполуки. Важкі метали це хімічні елементи зі значною атомною масою та щільністю. Вони беруть активну участь у біологічних процесах, тому як входять до складу багатьох ферментів. Група «важких металів» в багатьох випадках співпадає з групою мікроелементів. Важкі метали та їх сполуки негативно впливають на живі організми. До них відносяться свинець, цинк, кадмій, ртуть, молібден, хром, марганець, нікель, олово, кобальт, титан, мідь, ванадій.

Одним з найпотужніших та найбільш розповсюджених хімічних забруднень є забруднення природного середовища важкими металами. Важкі метали, що потрапляють до організму залишаються в ньому назавжди.

Звісно, джерела потрапляння є як природні (вивітрювання гірських порід і мінералів, ерозії, вулканічна діяльність) та техногенні (видобуток та переробка корисних копалин, транспорт, гальванічне виробництво і таке інше).

Частина техногенних викидів потрапляє в природне середовище у вигляді аерозолів, інша частина потрапляє у водойми. У водойми важки метали потрапляють з недостатньо очищеними стічними водами та поверхневим стоком з підприємств, на яких використовується гальванічне покриття поверхонь металевих виробів або там де використовуються фарбники.

Численність проблем, пов'язаних з організацією гальванічного виробництва, призвело до того, що вони стали об'єктом підвищеної уваги спеціалістів різних областей.

Виникає необхідність в ретельному очищенні стічних вод, до складу яких входять іони важких металів. Відомо багато методів очистки цих видів стічних вод, які детально описані у літературних джерелах [6,7, 9, 14, 15, 22].

Зупинимося на методі гальванокоагуляції. Метод очищення води від іонів важких металів гальванокоагуляцією знаходить широке застосування в технологіях очищення промивних вод, які утворюються при промиванні деталей в процесі нанесення гальванічних покриттів. В основу методу покладене утворення коротко замкнутих гальванічних пар при взаємодії металів з різними електрохімічними потенціалами в електропровідному середовищі.

У методі гальванокоагуляції, в загальному випадку, використовуються завантаження з металів із різними електрохімічними потенціалами. У передбачуваному технологічному процесі як анод використовується металевий магній, а як катод – графіт або активоване вугілля. Останній може бути оброблений, як сорбент, тому що в даному випадку він використовується як електропровідний матеріал з

$$n_0 \frac{dC_n}{dt} = -V_x \frac{dC_n}{dt} - V_y \frac{dC_n}{dt} - V_z \frac{dC_n}{dt} - D \left(\frac{d^2 C_n}{dx^2} + \frac{d^2 C_n}{dy^2} + \frac{d^2 C_n}{dz^2} \right) - r_1, \quad (1)$$

де: n_0 – пористість завантаження, початкова; C_n – концентрація іонів важких металів; V_{xyz} – швидкість руху води щодо

малим електрохімічним опором. Вибір катода й анода прийнятий з урахуванням значної різниці їх стандартних електрохімічних матеріалів.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Розглянемо цей метод з точки зору математичного опису процесу очищення методом фільтрування через завантаження з активованого вугілля в присутності іонів магнію, які надходять в товщу фільтру у результаті розчинення магнієвих стержнів.

При розробці математичної моделі процесу очищення від важких металів за допомогою гальванокоагуляції прийняті наступні припущення:

- стоки, які містять іони важких металів, подаються на завантаження, у якому відбуваються окислювально-відновні процеси;

- після фільтрування через окислювально-відновне завантаження у воді утворюються зважені речовини – продукти хімічної реакції у вигляді гідроксидів і оксидів;

- швидкість окислювально-відновних процесів у завантаженні залежить від якісних показників (температури, рН, солемісту), складу фільтруючого завантаження і описується за допомогою константи швидкості процесу;

- завантаження, у процесі очищення води, змінює свої властивості за рахунок розчинення й утворення солей магнію в розчині;

- хімічна реакція відбувається в гомогенній системі (можна записати $r_1 = K_0 C_0$, де K_0 – константа швидкості).

Зміну кількості важких металів у розчині, після фільтрування через окислювально-відновне завантаження опишемо рівнянням балансу маси:

відповідних осей координат; D – дифузія іонів металів у розчину; r_1 – хімічна реакція у розчині.

Припустимо, що розподіл речовини по площі фільтру буде рівномірним, тоді маємо рівняння:

$$\frac{dC_1}{dy^2} = \frac{dC_1}{dz^2} = 0;$$

$$\frac{dC_2}{dy^2} = \frac{dC_2}{dz^2} = 0;$$

$$\frac{dC_3}{dy^2} = \frac{dC_3}{dz^2} = 0;$$

$$n_0 \frac{dC_1}{dt} = V_0 \frac{dC_1}{dx} - D \left(\frac{d^2 C_1}{dx^2} \right) - K_0 C_1; \quad (2)$$

$$n_0 \frac{dC_1}{dt} = V_0 \frac{dC_3}{dx} - D \left(\frac{d^2 C_3}{dx^2} \right) - K_0 C_1 - K_2 C_3, \quad (3)$$

де $K_2 = const$ та $K_3 = K_1 + K_0$.

Дифузія, згідно з [1], може бути прийнята як:

$$D = D_T - D_M,$$

де: D_T – турбулентна дифузія; D_M – молекулярна дифузія.

У порах фільтруючого завантаження утвориться тонкий примежовий шар, у межах якого відбувається змінення концентрації контактуючого з завантаженням розчину.

У примежовому шарі процеси дифузії визначаються відстанню від вільної поверхні, а коефіцієнт турбулентної дифузії можна записати:

$$D = L^2 \frac{V_0^2}{\lambda}, \quad (4)$$

де: V_0 – характерний розмір швидкості;

λ – розмір зони загасання турбулентності розчину від вільної поверхні.

У тонких плівках, при $L = \delta$ (δ – дифузійний шар), коефіцієнт турбулентної дифузії може бути прийнятий рівним коефіцієнту молекулярної дифузії [7], що при фільтрації розчину не перевищує $0,1V$ і, отже, можна вважати, що:

$$V_x \frac{dC_1}{dx} \gg D \left(\frac{d^2 C_1}{dx^2} \right).$$

Тоді рівняння (2) спрощується до наступного:

$$n_0 \frac{dC_1}{dt} = -V_0 \frac{dC_1}{dx} - K_0 C_1. \quad (5)$$

$$\frac{dC_n}{dy^2} = \frac{dC_n}{dz^2} = 0.$$

Визначати всі іони важких металів, які наявні або можуть бути присутніми у розчині, немає сенсу, тому що процес очищення методом гальваноксагуляції відбувається однаково для кожного компонента.

У рівнянні (1) замінімо C_n на C_1 отримувемо рівняння, яке буде мати вигляд:

Ліва частина рівняння (5) представляє зміну концентрації у воді іонів вибраного металу у часі, а перший член рівняння (5) у правій частині – зміни концентрації іонів по товщині фільтруючого завантаження, а другий член відповідає хімічній реакції утворення нерозчинних з'єднань. Поводження фільтруючого завантаження з окисно-відновними властивостями можна описати подібними рівняннями балансу маси по зміні показників завантаження в часі. Як такий показник - приймемо зміну кількості магнію, тому що друга частина завантаження – графіт або активоване вугілля залишається практично без зміни.

За аналогією з (5) балансове рівняння для фільтруючого завантаження, має вигляд:

$$n_0 \frac{dC_2}{dt} = -V_0 \frac{dC_2}{dx} - K_0 C_2, \quad (6)$$

де: C_2 – маса одиниці об'єму фільтруючого завантаження по магнію.

Для спрощення задачі та враховуючи, що кількість магнію достатня для протікання окислювально-відновної реакції, зміною кількості магнію можна нехтувати. Таким чином реакція гальваноксагуляції розглядається одномірною задачею. Можна використати інтегральне перетворення Лапласа по змінній t , де отримуємо в області зображень Лапласа наступну

систему диференціальних рівнянь (s- комплексна змінна):

$$V_0 \frac{dC_1}{dx} + (K_3 + sn_0)C_1 = n_0 C_1^0; \quad (7)$$

$$C_1(x, t) = C_1^0 e^{\frac{K_3 t}{V_0}} - C_1^0 e^{\frac{K_1 t}{V_0}} \eta \left(t - \frac{n_0}{V_0} x \right) + C_{01} e^{\frac{K_1 t}{V_0}} \eta \left(t - \frac{n_0}{V_0} x \right); \quad (9)$$

$$C_1(x, t) = \frac{C_1^0 K_0}{K_2 - K_3} \left(e^{\frac{K_3 t}{V_0}} - e^{\frac{K_2 t}{V_0}} \right) \left(1 - \eta \left(t - \frac{n_0}{V_0} x \right) \right) + C_{01} e^{\frac{K_2 t}{V_0}} \left(1 - \eta \left(t - \frac{n_0}{V_0} x \right) \right) + C_{01} K_0 \frac{e^{\frac{K_3 t}{V_0}} - e^{\frac{K_2 t}{V_0}}}{K_2 - K_3} \eta \left(t - \frac{n_0}{V_0} x \right) + C_{03} e^{\frac{K_2 x}{V_0}} \eta \left(t - \frac{n_0}{V_0} x \right). \quad (10)$$

А для $t < \frac{n_0}{V_0} x$ маємо:

$$C_1(x, t) = C_{01} e^{\frac{K_3 x}{V_0}}; \quad (11)$$

$$C_1(x, t) = C_{01} K_0 \frac{e^{\frac{K_3 t}{V_0}} - e^{\frac{K_2 t}{V_0}}}{K_2 - K_3} + C_{03} e^{\frac{K_2 x}{V_0}}. \quad (12)$$

Співвідношення (11, 12), описують процес очищення забруднених стічних вод у фільтрі від важких металів.

Треба нагадати, що для того щоб отримати стабільний результат очищення необхідно дотримуватися постійної швидкості фільтрування (метод «постійної» швидкості) при якому необхідно збільшувати напір в початковому перетині на величину втрат напору. Завдяки цьому можна визначити фільтроцикл, тобто час роботи фільтру між промиваннями.

У результаті проведеного літературного аналізу в роботі Олійника О. Я. [7] була запропонована формула для розрахунку втрат напору у фільтрі. Формула має вигляд:

$$\Delta h(L; t) = \beta L e^{\frac{\alpha_0 A \sigma_{3c}(l)}{1 - A \sigma_{3c}(l)}},$$

де σ_{3c} – усереднене значення масової концентрації продуктів реакції за об'ємом фільтру.

При розробці та внаслідок аналізу, а також розв'язавши рівняння математичної моделі отримані формули для розрахунку робочої висоти завантаження фільтру при достатній кількості іонів

$$V_0 \frac{dC_3}{dx} + (K_2 + sn)C_3 - K_0 C_3 = n_0 C_3^0. \quad (8)$$

Опираючись на інтегральні перетворення Лапласа по просторовій змінній одержимо систему алгебраїчних рівнянь [8,9,10]:

магнію $L = \frac{V_0}{K_1} \ln \frac{C_{01}}{C_1}$. Втрати напору у фільтрі визначимо за формулою описаною Олійником О. Я. та наведеною вище.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Таким чином, до важливих заходів реалізації щодо зниження екологічної небезпеки гальванічного виробництва необхідно використовувати менш шкідливі хімічні речовини, повторно використовувати рідкі та тверді відходи.

Можна виділити три основних напрямлення для скорочення негативного впливу гальванічного виробництва.

Перша група пов'язана з проведенням робіт пов'язаних з технологіями методів обробки. Основна мета – це зменшення хімічної небезпеки та вмісту окремих речовин в розчинах та електролітах.

Друга група пов'язана з проведенням робіт, які повинні бути направлені на оптимізацію водокористування та водовідведення. Основною метою є скорочення об'єму речовин-забруднювачів, які утворюються.

Третя група заходів пов'язана з проведенням робіт направлених на скорочення

кількості небезпечних хімічних речовин, які потрапляють з стічними водами у водні об'єкти. Основна мета – очистка стічних вод від токсичних речовин до встановлених нормативних величин.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Виноградов С. С.** Экологически безопасное гальваническое производство / Под ред. проф. В. Н. Кудрявцева. М.: Глобус, 2002. 352 с.
2. **Ильин В. И., Губин А. Ф., Колесников В. А.** Минимизация образования опасных химических жидких отходов в гальванотехнике (обзор). Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России, 2011, № 1. С. 29–42.
3. **Данилов-Данильян В. И.** Глобальная проблема дефицита пресной воды // Век глобализации, 2008, №1. С. 45-56.
4. **Данилов-Данильян В. И.** Потребление воды: экологические, экономические, социальные и политические аспекты / В. И. Данилов-Данильян, К. С. Лосев. М.: Наука, 2006. 221 с.
5. **Кафаров В. В.** Основы массопередачи. М.: Высшая школа, 1975. 155с.
6. **Романенко Н. Г., Курькина М. И.** Гидромеханические процессы химической технологии. Л.: Химия, 1982. 288с.
7. **Олійник О. Я., Кисельов С. К.** Теоретичні дослідження втрат напору на очисних фільтрах при знезалізненні води // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, 1. К.: КНУБА, 2003, С. 3–12.
8. **Терновцев В. О., Василенко Л. О.** Теоретичні основи очищення води від іонів важких металів гальванокоагуляцією, // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки, 1. К.: КНУБА, 2003. С. 80–85.
9. **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.: КНУБА, 2000. 158 с.
10. **Tatura H., Goto K., Nagayama M.** The effect of ferric hydroxide on the oxygenation of ferrous ions in neutral solutions. // Corros. Sci., 1976, 16(4), P.197–207.
11. **Sung W., Morgan J. J.** Kinetics and product of ferrous iron oxygenation in aqueous system. Environ.Sci and Technol. 1980, 14(5). P. 561-568.
12. **Jobin R., Chosh M. M.** Effect of buffer intensity and organic matter on oxygenation of ferrous iron. Journal – American Water Works Association, 1972, 64(9). P.590-595.
13. **Hackett J.** A review of chemical treatment strategies for iron bacteria in wells. Water. Well J., February, 1987. P. 37-42.
14. **Smith S.** A Lauman's guide to iron bacteria problems in wells. Wat. Well J., June, 1980, p. 40-42.
15. **Smith S.** Culture methods for the anumeration of iron bacteria from water well somples – a critical literature review. Ground Wat., 20(4), 1982, p. 482-485.
16. **Tuhela L., Carlson L., Tuovinen O. H.** Biogeochemikal transformations of Fe and Mn in oxic groundwater and well water environmenst. J. Environ. Sci. and Health. A., 1997, 32(2). 407-426.
17. **Koenig L.** Survey and analysis of Well Stimulation Performance. Journal – American Water Works Association, 52(3), 1960. 333-350.
18. **Woolschlager J, Rittmann B. E.** Que mesurent les tests de CODB et de COA? Revue des sciences de l'eau, 2005, 8(3), 371-385.
19. **Stumm W., Lee G. F.** The chemistry of aqueous iron. Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, 1960, 22(1), 295-319.
20. **Rebhun M.** Contact flocculation-filtration of humic substances. Water Res., 1984, 18(8). P. 963-970.
21. **McGhee T. J.** Water supply and sewerage. NewYork, 1991, 602 p.
22. **Schenk J. E., Weber W. J.** Chemical Interactions of Dissolved Silica with Iron (II) and (III). Journal – American Water Works Association. 1968, 60(2), 199-212.

REFERENCES

1. **Vinogradov, S. S. (2002).** *Environmentally friendly electroplating*. Moscow: Globus. [in Russian]
2. **Iyin, V. I., Gubin, A. F., & Kolesnikov, V. A. (2011).** Minimization of the formation of hazardous chemical liquid waste in electroplating (review). *Defense complex – to the scientific and technical progress of Russia, 1*, 29-42. [in Russian]
3. **Danilov-Danilyan, V. I. (2008).** Global problem of shortage of fresh water. *Age of Globalization, 1*, 45-56. [in Russian]
4. **Danilov-Danilyan, V. I. (2006).** *Water consumption: environmental, economic, social and political aspects*. Moscow: Nauka. [in Russian]
5. **Kafarov, V. V. (1975).** *Basics of Mass Transfer*. Moscow: Higher school [in Russian]
6. **Romanenko, N. G., & Kurykina, M. I. (1982).** *Hydromechanical processes of chemical technology*. Leningrad: Chemistry. [in Russian]
7. **Oliylyk, O. Ya., & Kiselyov, S. K. (2003).** Theoretical research of pressure losses on purification filters during water deironing. *Problems of water supply, sewerage and hydraulics, 1*, 3-12. [in Ukrainian]
8. **Ternovtsev, V. O., & Vasylenko L. O. (2003).** Theoretical bases of water purification from heavy metal ions by galvanocoagulation, *Problems of water supply, sewerage and hydraulics, 1*, 80-85. [in Ukrainian]
9. **Kiselev S. K. (2004).** *Modeling and calculations of deironing of water on purification filters taking into account changes of hydraulic properties of loading* (Candidate's thesis). Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv. [in Russian]
10. **Tatura, H., Goto, K., & Nagayama, M. (1976).** The effect of ferric hydroxide on the oxygenation of ferrous ions in neutral solutions. *Corrosion Science., 16*(4), 197-207. doi:10.1016/0010-938x(76)90046-9
11. **Sung, W., & Morgan, J. J. (1980).** Kinetics and product of ferrous iron oxygenation in aqueous system. *Environmental Science & Technology, 14*(5), 561-568. doi: 10.1021/es60165a006
12. **Jobin, R., & Chosh, M. M. (1972).** Effect of buffer intensity and organic matter on oxygenation of ferrous iron. *Journal – American Water Works Association, 64*(9), 590-595. doi:10.1002/j.1551-8833.1972.tb02752.x
13. **Hackett, J. (1987).** A review of chemical treatment strategies for iron bacteria in wells. *Water. Well J., February*, 37-42.
14. **Smith, S. (1980).** A Lauman's guide to iron bacteria problems in wells. *Water. Well J., June*, 40-42.
15. **Smith, S. (1982).** Culture methods for the anumeration of iron bacteria from water well somples – a critical literature review. *Ground Wat., 20*(4), 482-485.
16. **Tuhela, L., Carlson, L., & Tuovinen, O. H. (1982).** Biogeochemikal transformations of Fe and Mn in oxic groundwater and well water environments. *J. of Envir. Science and Health. Part A: Envir. Science and Engineering. and Toxicology, 32*(2), 407-426. doi: 10.1080/10934529709376551
17. **Koenig, L. (1960).** Survey and analysis of Well Stimulation Performance. *Journal – American Water Works Association, 52*(3), 333-350. doi: 10.1002/j.1551-8833.1960.tb00497.x
18. **Woolschlager, J., & Rittmann, B. E. (2005).** Que mesurent les tests de CODB et de COA? *Revue des sciences de l'eau, 8*(3), 371-385. doi: 10.7202/705229ar
19. **Stumm, W., & Lee, G.F. (1960).** The chemistry of aqueous iron. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie, 22*(1), 295-319. doi: 10.1007/bf02503278
20. **Rebhun, M. (1984).** Contact flocculation-filtration of humic substances. *Water Res., 18*(8). 963-970. doi:10.1016/0043-1354(84)90246-x
21. **McGhee, T. J. (1991).** *Water supply and sewerage*. New York: McGraw-Hill.
22. **Schenk, J. E., & Weber, W. J. (1968).** Chemical Interactions of Dissolved Silica with Iron (II) and (III). *Journal – American Water Works Association, 60*(2), 199-212. doi:10.1002/j.1551-8833.1968.tb03534.x

**Theoretical fundamentals of mathematical modeling of the process
of wastewater treatment of galvanic productions**

*Lesya Vasylenko, Oleksii Vasylenko, Stanislav Fedorenko,
Yuliia Bereznytska*

Abstract: Among the problems of environmental protection an important place is occupied by the decision of the questions directed on minimization of natural objects pollution. Pollution by hazardous chemicals of the environment (surface water bodies, atmospheric air, soil) has a negative impact on the state of the biosphere and on the population health. Intensive development of industry, agriculture, infrastructure and other industries directly affect the environment. Electroplating is a common component in many industries. In turn, emissions from galvanic production lead to environmental and economic losses. One of the issues that still needs to be addressed is the disposal of waste from such industries. Heavy metals enter the reservoirs with runoff of insufficiently treated wastewater and surface runoff from enterprises that use galvanic coating of metal surfaces or where dyes are used. Such a method of wastewater treatment from heavy metal ions as galvanocoagulation is widely used in the treatment of wash water, which is a waste from the process of electroplating. In this article, a mathematical model of the process of wastewater treatment from heavy metal ions by electroplating was developed and proposed on the basis of research and analysis of existing wastewater treatment processes from heavy metal ions. As a result of solving this mathematical problem, formulas were obtained for calculating the working height of the filter with a sufficient number of magnesium ions. Conclusions are also given on ways to reduce the negative impact of galvanic production on the components of the environment. Thanks to the use of a systematic approach, organizational and technical solutions, effective wastewater treatment will be ensured from pollution and the amount of production waste will be reduced.

Keywords: heavy metal ions; pollution; environment; galvanic production; wastewater.

Стаття надійшла до редакції 23.11.2020