



Филипчук Л. В., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

СИНТЕЗ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВИТРАТОЮ РЕАГЕНТІВ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ТОКСИЧНИХ ДОМІШОК У СТІЧНИХ ВОДАХ В РЕАКТОРІ ПЕРІОДИЧНОЇ ДІЇ

В статті наведено вирішення задачі регулювання витрати реагентів при відновленні токсичних домішок при очищенні стічних вод в реакторах періодичної дії. Недоліком існуючих систем дозування є те, що в процесі реакції відновлення підвищується активна реакція середовища стічної води. Це значно зменшує ефективність відновлення і потребує безперервної підтримки значення рН у заданих межах та дозування надлишкової кількості відновника. Враховуючи взаємну пов'язаність процесів відновлення та підкислення для системи керування, найбільш ефективним є метод комплексного поетапного регулювання параметрів рН та Eh, який полягає у поетапному, послідовному на кожному із етапів дозуванні реагентів за вимірними значеннями окисно-відновного потенціалу Eh та активної реакції середовища рН з наступною стабілізацією окисно-відновного потенціалу води. Розроблена методика визначення параметрів регулятора в системі керування із зворотним зв'язком з поетапним періодичним регулюванням параметрів для знешкодження шестивалентного хрому у реакторі періодичної дії. Методика дозволяє визначити параметри регулятора, які дозволяють перевести об'єкт з одного стану в інший за заданий проміжок часу при відповідній кількості реагенту.

Ключові слова: очищення стічних вод; системи керування; автоматизація; дозування реагентів; токсичні домішки.

Вступ та постановка проблеми. У виробництві гальваніки та друкованих плат особливо небезпечним для людини є шестивалентний хром, який проявляє значний канцерогенний та загальнотоксичний вплив. Знешкодження хрому (VI), іони якого мають окислювальні властивості проводиться шляхом його відновлення до хрому (III), який є значно менш токсичним, за допомогою дозування реагентів-відновників у кислому середовищі при рН менше 3,0 [1–3].

Методи керування процесом очищення хромвмісних стічних вод за результатами прямого безперервного аналізу концентрації шестивалентного хрому у воді практично не застосовуються у зв'язку із складністю методики, апаратури і значною тривалістю лабораторного визначення вмісту цього домішку. Оскільки під час відновлення домішок змінюються окисно-відновні властивості стічної води, то оцінку цього процесу можна проводити за допомогою вимірювання активної реакції (pH) та окисно-відновного потенціалу (Eh) водного середовища [4–6].

Існуючі технології знешкодження хрому здійснюється шляхом одноразового дозування кислоти та відновників у непроточний змішувач-реактор, в якому знаходиться стічна вода. Недоліком існуючих систем дозування є те, що в процесі реакції відновлення підвищується активна реакція середовища (pH) стічної води, що значно зменшує ефективність відновлення і потребує безперервної підтримки значення pH в заданих межах і дозування надлишкової кількості відновника. Крім того, для оцінки ступеня відновлення хрому необхідно періодично відбирати проби стічної води на наявність шестивалентного хрому, що значно ускладнює технологічний процес очищення стічних вод. Тому актуальною є розробка систем автоматизованого дозування реагентів з безперервним контролем процесу знешкодження хромвмісних стічних вод шляхом відновлення хрому (VI) і мінімізацією кількості введених реагентів в непроточних реакторах-змішувачах. Використання таких автоматизованих систем повинно базуватись на моделюванні процесів реагентного окиснення-відновлення токсичних домішок у змішувачах-реакторах періодичної дії у непроточних умовах [7].

Аналіз існуючого стану

Враховуючи взаємну пов'язаність процесів відновлення та підкислення для системи керування, найбільш ефективним є метод комплексного поетапного регулювання параметрів pH та Eh, який полягає у поетапному, послідовному на кожному із етапів дозуванні реагентів за виміряними значеннями окисно-відновного потенціалу Eh та активної реакції середовища pH з наступною стабілізацією окисно-відновного потенціалу води [8].

Керування процесом, як об'єктом із двома керуючими діями та двома вихідними величинами, здійснюється в наступній послідовності. Спочатку у стічну воду дозується соляна кислота для доведення pH стічної води до pH нижче 3,0. Надалі вводиться деяка



кількість відновника Na_2SO_3 до зниження E_h першого проміжного значення для часткового відновлення домішок. Після цього протягом визначеного часу протікає процес відновлення домішок без введення реагентів, внаслідок чого стабілізується величина E_h та супутньо протікає підвищення рН. Після стабілізації E_h знову проводиться дозування кислоти для зниження рН. Потім знову дозується відновник до меншого проміжного значення E_h і проводиться стабілізація хімічного процесу. Таке послідовне періодичне дозування реагентів проводиться до досягнення кінцевого значення величини E_h , при якому забезпечується повне окиснення-відновлення токсичних домішок при встановленому значенні рН водного середовища. Параметри системи керування (кількість етапів n та проміжні значення E_{h_i}) визначають в лабораторних умовах на реальній стічній воді і при необхідності коригують при пусконаладжувальних роботах.

У випадку хімічного реактора періодичної дії час перехідного процесу та діапазон зміни параметру залежать не від витрати, а від кількості реагенту, яка була використана за час перехідного процесу. В силу суттєвої нелінійності об'єкта [9; 10], при зміні кількості реагенту за такий самий проміжок часу зміняться також і перехідні функції об'єкта.

Отже, потрібно знайти такі параметри регулятора для кожного із етапів дозування реагентів, за яких для таких самих кількостей реагенту, як і при знятті перехідних характеристик, за такий же час параметр буде змінений на таку ж величину. Інакше кажучи, регулятор шляхом неперервного дозування реагенту повинен відтворити експериментальну криву розгону, зняту при ступінчастій зміні витрати реагенту.

Тому завданням локального регулятора є переведення об'єкта від початкового стану до нового стану, який визначається завданням регулятора. Такий перехід здійснюється шляхом зміни витрати реагенту, яка була затрачена за час перехідного процесу. Характер зміни витрати (перехідний процес по витраті) в замкнутій системі регулювання залежить як від властивостей об'єкта, так і від параметрів регулятора [11; 12].

Методика визначення параметрів регулятора в системі керування із зворотним зв'язком для реакторів періодичної дії з поетапним періодичним регулюванням параметрів полягає в постановці задачі синтезу системи керування та визначення шляхів її розв'язку. Вихідними даними для синтезу системи є параметри

об'єкта, початковий стан об'єкта $y(t_0)$, час регулювання t_f , завдання регулятора y_z (кінцевий стан об'єкта $y(t_f)$), кількість реагенту M , необхідна для такої зміни стану, та бажаний характер перехідного процесу $y_e(t)$. Вихідні дані отримують шляхом проведення експериментів.

Ставиться задача знаходження таких параметрів регулятора, при яких об'єкт із стану $y(t_0)$ за час t_f буде переведений у стан y_z витративши для цього кількість реагенту M , відтворивши при цьому характер перехідного процесу $y_e(t)$. Завдання може бути вирішене шляхом розв'язку наступної задачі оптимізації: знайти такі параметри регулятора K та K_i , при яких нижчезазначений критерій досягне мінімального значення [8].

$$\min_{K, K_i} J(K, K_i) = R_1 |(y(t_f, K, K_i) - y_z)| + R_2 \left(\int_0^{t_f} |y(t, K, K_i) - y_e(t)|^n dt \right) + R_3 \left(\int_0^{t_f} |u(t, K, K_i)| dt - M \right)$$

Класичним аналітичними методами така задача не розв'язується, що потребує застосування оптимізаційних процедур.

Метою роботи є синтез локальних систем керування витратою реагентів для зміни рН та Eh при відновленні токсичних домішок у стічних водах в реакторі періодичної дії.

Методи та прилади. Дослідження проводились у змішувачі-реакторі періодичної дії з механічною мішалкою, в якому були розміщені датчики рН та Eh. Застосування непроточного змішувача-реактора обумовлювалось необхідністю ступеневого дозування реагентів для окремого регулювання рН та Eh і забезпеченням стабілізації цих параметрів у часі після кожного етапу введення реагентів. Дозування реагентів для відновлення хрому (VI) проводилось у чотири етапи. Вимірювання проводилось на сертифікованих приладах фірми «Prominent», зокрема переносного вимірювального пристрою Portames, первинних вимірювальних перетворювачів рН «PHES 112 FE 301 S» (діапазон 1–12 од., робоча температура 0–60° С, максимальний тиск 3 атм.) та Eh «RHES-Pt-FE 301 B» (робоча температура 0–60° С, максимальний тиск 3 атм.), вторинних вимірювальних пристроїв «DULCOMETER Compact». Вимірювання величин рН і Eh проводилось після стабілізації значень цих параметрів. Для вимірювання концентрацій важких металів застосовувались стандартні методики проведення хімічних аналізів (колориметричний та потенціометричний) у сертифікованих лабораторіях України.

Для вирішення поставленої задачі застосовувався блок параметричної оптимізації NCD Blockset середовища MatLab-



Simulink. Блок призначений для параметричної оптимізації динамічних систем, моделі яких задані в середовищі Simulink. Процедура оптимізації з метою визначення оптимальних параметрів: об'єктів регулювання – у випадку їх параметричної оптимізації, настроювання параметрів регулятора – у випадку оптимізації САР для заданої у вікні Simulink системи вхідних та вихідних величин, а також графічно допустимих меж зміни перехідних процесів здійснюється блоком NCD автоматично. Число блоків NCD у вікні моделі Simulink, в яких задають межі зміни перехідних процесів у випадку декількох вихідних величин, не обмежується.

Викладення результатів досліджень. Одним із шляхів розв'язку поставленої задачі може бути застосування блоку параметричної оптимізації NCD Blockset середовища MatLab-Simulink. Блок призначений для параметричної оптимізації динамічних систем, моделі яких задані в середовищі Simulink. Процедура оптимізації (визначення оптимальних параметрів: об'єктів регулювання – у випадку їх параметричної оптимізації, настроювання параметрів регулятора – у випадку оптимізації САР тощо) для заданої у вікні Simulink системи, заданих вхідних та вихідних величин, а також заданих графічно допустимих меж зміни перехідних процесів (для декількох вихідних величин), здійснюється блоком NCD автоматично. Оптимізація здійснюється методом штрафних функцій шляхом мінімізації функції штрафу за порушення заданих меж перехідного процесу. Число блоків NCD у вікні моделі Simulink, в яких задають межі зміни перехідних процесів (у випадку декількох вихідних величин) не обмежується. Після завершення процесу оптимізації отримані значення оптимальних параметрів передаються блоком в робочу область (оперативну пам'ять) Matlab, звідки вони можуть бути зчитані або передані іншим програмам.

Як приклад, розглянемо послідовність параметричної оптимізації системи автоматичного регулювання рН на другому етапі дозування реагентів для очищення води від хрому (VI).

Експериментальні дані кривої розгону:

– рН=[3,70; 3,3; 3,00; 2,90; 2,80; 2,70];

– t =[90; 100; 110; 120; 130; 138];

– маса реагенту, затрачена на проведення реакції $m=240$ г.

Функція передачі об'єкта на цьому діапазоні зміни рН та для такої маси затраченого реагенту:

$$W_{22}(s) = \frac{-0.22}{21.1s + 1} \quad (1)$$

Функція передачі регулятора:

$$W_{R22}(s) = k_P + \frac{k_I}{s} . \quad (2)$$

Потрібно знайти параметри ПІ регулятора k_P та k_I такі, щоб змінити значення рН від 3,70 од. до 2,70 од. за час 48 с, затративши 240 г реагенту.

Побудуємо структурну схему системи регулювання у вікні середовища Simulink (рис. 1).

Початкове та кінцеве значення рН задамо у блоках Step1 та Step відповідно. У вікні параметрів моделювання встановимо час моделювання від 0 до 48 с. Вікна NCD Outport (рис. 2) та NCD Outport1 (рис. 3) призначені для оптимізації перехідних процесів. У вікні блоку NCD Outport встановлюємо бажані межі перехідного процесу значення параметру рН. Важливим є встановлення межі обмеження в кінці перехідного процесу. Вона визначає величину відхилення значення параметру від заданого значення в кінці періоду дозування. Блок NCD Outport1 під'єднуємо до виходу інтегратора витрати реагенту та встановлюємо верхню межу 240 мг. У вікні блоку NCD Outport1 відображається зміна маси поданого в процесі регулювання реагенту. Задаємося початковим наближення параметрів регулятора, наприклад $k_P = 1$ та $k_I = 1$, та запускаємо на виконання процес параметричної оптимізації. Після закінчення процесу отримуємо значення параметрів регулятора: $k_P = 5.7915$; $k_I = 0.2854$ та графіки перехідних процесів у вікнах блоків NCD Outport1 (див. рис. 2 та рис. 3). Графіки порівняння перехідних процесів по рН та витраті реагентів в системі автоматичного регулювання з експериментальними та апроксимованими кривими розгону наведені на рис. 4 та рис. 5.

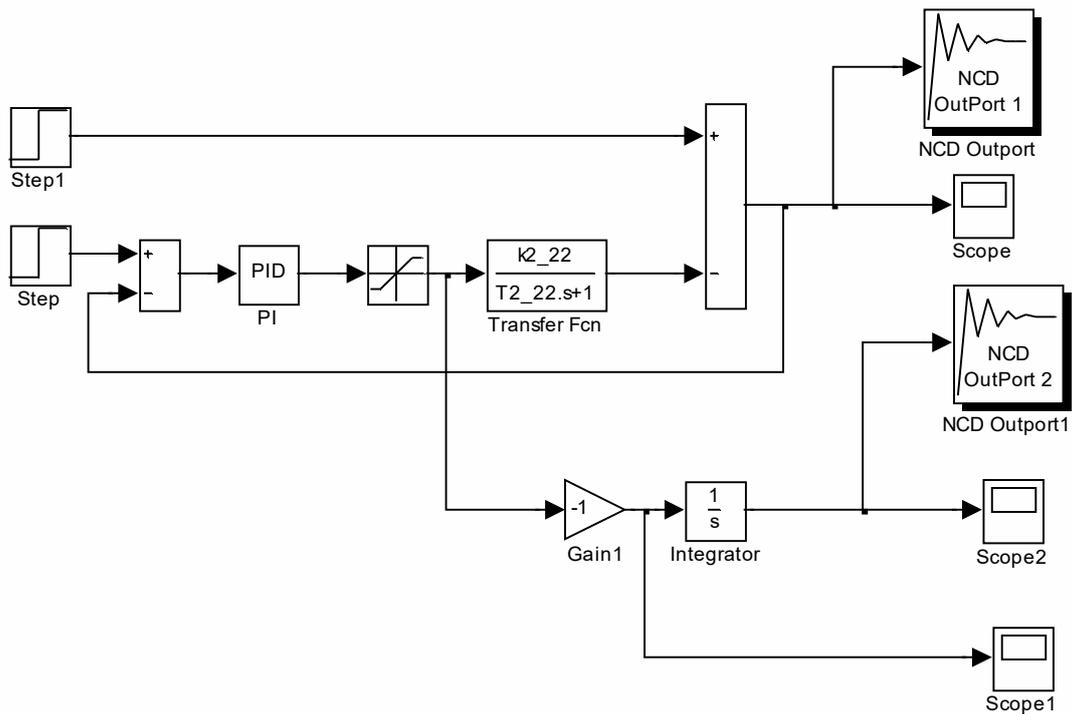


Рис. 1. Структурна схема системи регулювання у вікні Simulink

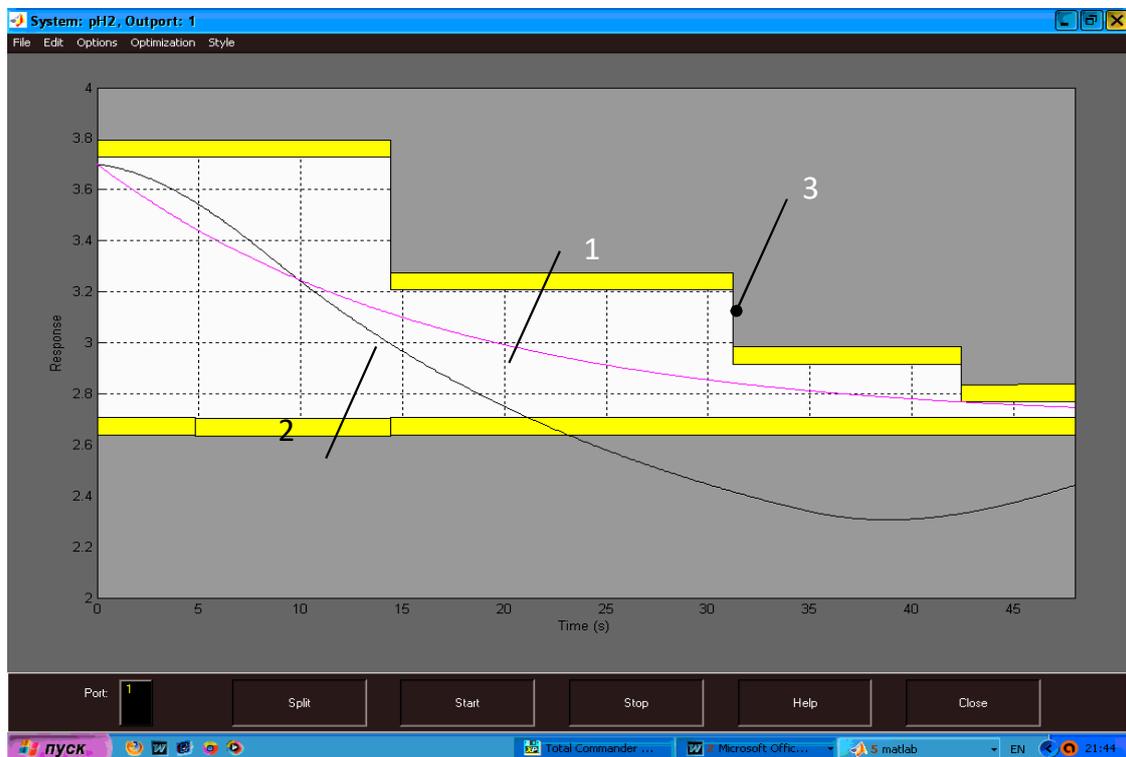


Рис. 2. Вікно блоку NCD Outport: 1 – перехідні процеси при початкових наближених значеннях параметрів регулятора; 2 – перехідні процеси при знайдених оптимальних значеннях; 3 – обмеження на перехідний процес

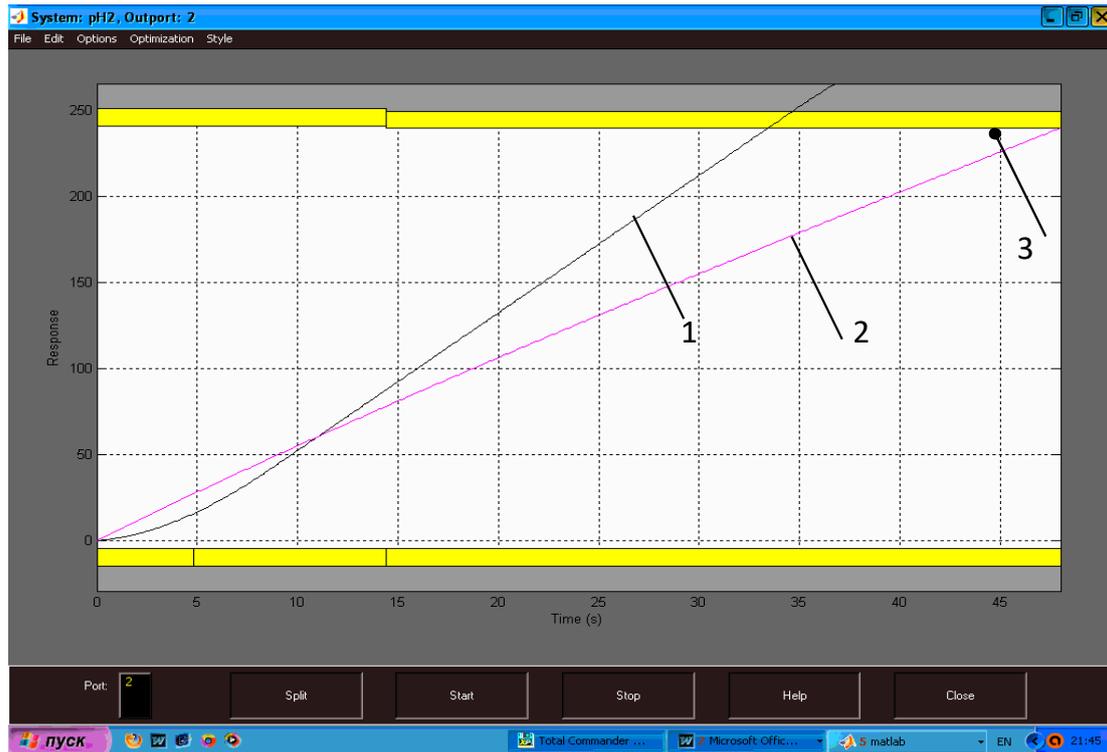


Рис. 3. Вікно блоку NCD Output 1: 1 – перехідні процеси при початкових наближених значеннях параметрів регулятора; 2 – перехідні процеси при знайдених оптимальних значеннях; 3 – обмеження на перехідний процес

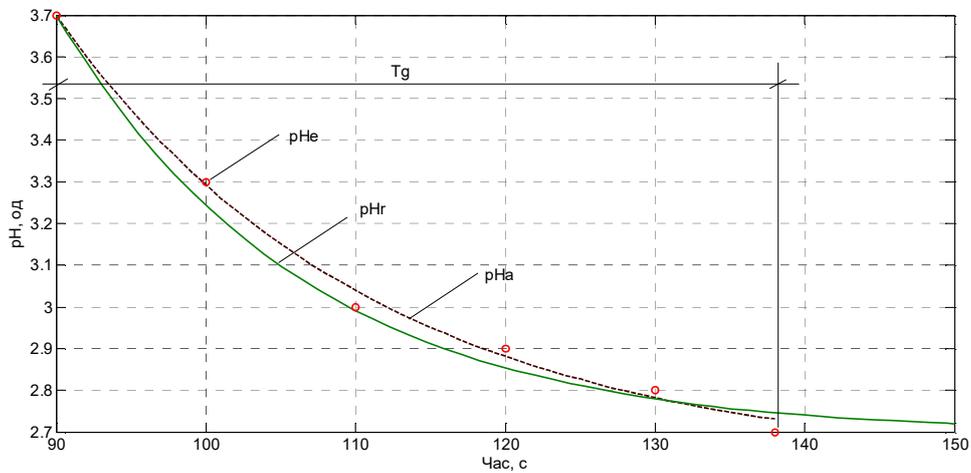


Рис. 4. Графік порівняння перехідних процесів зміни рН: рHe – точки експериментальної кривої розгону; рHr – перехідний процес в системі керування; рHa – крива розгону, апроксимована функцією передачі (залежність 2)

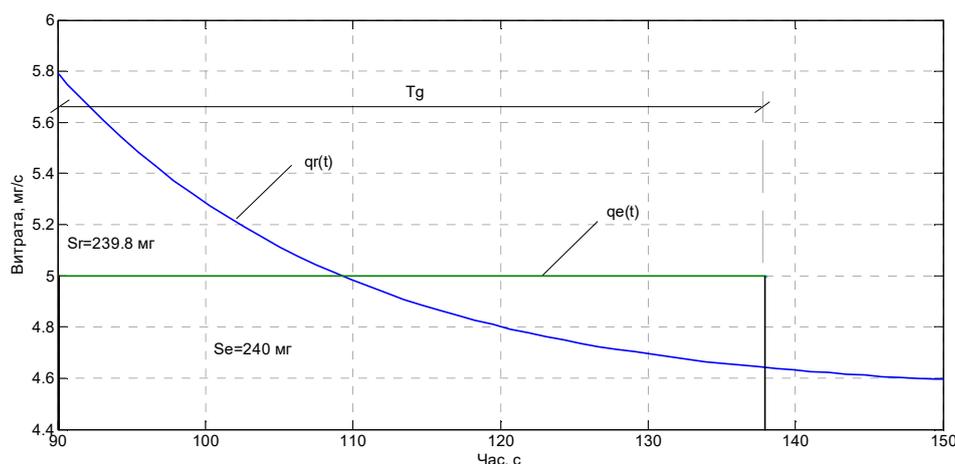


Рис. 5. Графік зміни витрати реагенту: T_g – період дозування реагенту; $q_r(t)$ – витрата реагенту в системі автоматичного керування; $q_e(t)$ – витрата реагенту при знятті експериментальної кривої розгону; S_r – введена маса реагенту за час T_g регулятором; S_e – введена маса реагенту за час T_g при знятті експериментальної кривої розгону

Знайдені подібним чином параметри регуляторів по усіх діапазонах для чотирьох етапів дозування реагентів наведено в таблиці.

Таблиця

Функції передачі регуляторів $W_R(s) = k_r + \frac{k_I}{s}$

Регулятор	Етап 1		Етап 2	
	дозування відновника	дозування кислоти	дозування відновника	дозування кислоти
Eh	kr11=0.0164 ki11=0.0021	-	kr11=0.0228 ki11=0.0022	-
pH	-	-	-	kr11=5.7915 ki11=0.2854
Регулятор	Етап 3		Етап 4	
	дозування відновника	дозування кислоти	дозування відновника	дозування кислоти
Eh	kr11=0.0271 ki11=0.0013	-	kr11=0.0198 ki11=0.0012	-
pH	-	kr11=2.8080 ki11=0.2004	-	kr11=0.0227 ki11=0.0012

За наведеним алгоритмом керування для параметрів моделі та параметрів настроювання локальних ПІ-регуляторів, визначених для

експериментальних даних перехідного процесу, виконане моделювання поетапного відновлення хрому (VI) у стічних водах.

Розроблена автоматизована система керування параметрами рН та Eh для очищення багатокomпонентних металовмісних стічних вод від шестивалентного хрому, ціанідів та фенол-формальдегіду запропонована у вигляді проєктної документації для ВАТ Київський завод «Радар» та ТзОВ «Яблуневий сад», м. Городок Львівської області, а також може бути використана для очищення інших стічних вод, що вміщують токсичні забруднення.

Висновки. Розроблена методика визначення параметрів регулятора в системі керування із зворотним зв'язком з поетапним періодичним регулюванням параметрів для знешкодження шестивалентного хрому у реакторі періодичної дії. Методика дозволяє визначення таких значень параметрів регулятора, які дозволяють перевести об'єкт з одного стану в інший за заданий проміжок часу при заданій кількості реагенту.

За розробленим алгоритмом побудована математична модель системи керування та виконано імітаційне моделювання процесу знешкодження токсичного шестивалентного хрому. Розроблена автоматизована система керування параметрами рН та Eh може бути використана для очищення стічних вод, що вміщують окисно-відновні токсичні забруднення.

1. F. Fu, Q. Wang. Removal of heavy metal ions from wastewaters. A review. *Journal of Environmental Management*. March 2011. Vol. 92, Is 3. Pp. 407–418.
2. R. Kurniawan, T. Agustiono. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*. 2006. Vol. 118.1. Pp. 83–98.
3. F. Fenglian, Q. Wang. Removal of heavy metal ions from wastewaters. *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92, Is. 3. Pp. 407–418.
4. H. T. Kim H, G. S. Kim, S. W. Shin, S. H. Oh, K. H. Kim. Application of ORP and pH as controlling factors in sequencing batch reactor. *KSCE, Journal of Civil Engineering*. 2005. Vol. 9(2). Pp. 73–79.
5. R.–F. Yu, H.–W. Chen, W.–P. Cheng, Y.–C. Shen. Dynamic control of disinfection for wastewater reuse applying ORP/pH monitoring and artificial neural networks. *Resources, Conservation and Recycling*. July 2008. Vol. 52, Is. 8–9. Pp. 1015–1021.
6. V. Fylypchuk, R. Salghi, L. Fylypchuk. Catalytic oxidation of phenol waste waters by hydrogen peroxide with the help of step-type regulation by redox-potential. *Appl. J. Envir. Eng. Sci.* 2018. Vol. 4, N 2. Pp. 189–197.
7. В. Л. Филипчук, В. В. Древецький, Л. В. Филипчук, М. І. Клепач. Природоохоронні системи очищення металовмісних стічних вод та автоматизоване регулювання їх параметрів. Рівне : НУВГП, 2016. 288 с.
8. Л. В. Филипчук. Моделювання роботи автоматизованої системи керування процесом реагентного відновлення токсичних домішок в



непроточних умовах. *Перспективні технології та прилади* : зб. наук. праць. Луцьк : ЛНТУ, 2022. Вип. 20 (вересень, 2022). С. 101–107. **9.** Bhaskar D. Kulkarni, Sanjeev S. Tambe. Nonlinear pH control. Chemical Engineering Division, National Chemical Laboratory, India, October 2001. **10.** Fosten. Control of chemical dosing in wastewater treatment. *World Pumps*. July 2007. Vol. 2007. Is. 490. Pp. 16–19. **11.** Ковела І. М. Обґрунтування оптимальної структури цифрових ПІ-, ПД- та ПІД-алгоритмів. *Вісник НУ «Львівська політехніка». Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології*. 2001. № 433. С. 11–22. **12.** Замкнені та нелінійні системи : навч. посіб. / А. І. Кубрак, О. А. Жученко, О. В. Ситніков. К. : НТУУ КПІ, 2012. 380 с.

REFERENCES:

1. F. Fu, Q. Wang. Removal of heavy metal ions from wastewaters. A review. *Journal of Environmental Management*. March 2011. Vol. 92, Is 3. Pp. 407–418.
2. R. Kurniawan, T. Agustiono. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*. 2006. Vol. 118.1. Pp. 83–98.
3. F. Fenglian, Q. Wang. Removal of heavy metal ions from wastewaters. *Journal of Environmental Management*. 2011. Vol. 92, Is. 3. Pp. 407–418.
4. H. T. Kim H, G. S. Kim, S. W. Shin, S. H. Oh, K. H. Kim. Application of ORP and pH as controlling factors in sequencing batch reactor. *KSCCE, Journal of Civil Engineering*. 2005. Vol. 9(2). Pp. 73–79.
5. R.–F. Yu, H.–W. Chen, W.–P. Cheng, Y.–C. Shen. Dynamic control of disinfection for wastewater reuse applying ORP/pH monitoring and artificial neural networks. *Resources, Conservation and Recycling*. July 2008. Vol. 52, Is. 8–9. Pp. 1015–1021.
6. V. Fylypchuk, R. Salghi, L. Fylypchuk. Catalytic oxidation of phenol waste waters by hydrogen peroxide with the help of step-type regulation by redox-potential. *Appl. J. Envir. Eng. Sci.* 2018. Vol. 4, N 2. Pp. 189–197.
7. V. L. Fylypchuk, V. V. Drevetskyi, L. V. Fylypchuk, M. I. Klepach. Pryrodokhoronni systemy ochyshchennia metalovmisnykh stichnykh vod ta avtomatyzovane rehuliuвання yikh parametriv. Rivne : NUVHP, 2016. 288 s.
8. L. V. Fylypchuk. Modeliuвання roboty avtomatyzovanoi systemy keruvannya protsesom reahentnoho vidnovlennia toksychnykh domishok v neprotochnykh umovakh. *Perspektyvni tekhnologii ta prylady* : zb. nauk. prats. Lutsk : LNTU, 2022. Vyp. 20 (veresen, 2022). S. 101–107.
9. Bhaskar D. Kulkarni, Sanjeev S. Tambe. Nonlinear pH control. Chemical Engineering Division, National Chemical Laboratory, India, October 2001.
10. Fosten. Control of chemical dosing in wastewater treatment. *World Pumps*. July 2007. Vol. 2007. Is. 490. Pp. 16–19.
11. Kovala I. M. Obgruntuvannya optymalnoi struktury tsyfrovyykh PI-, PD- ta PID-alhorytmiv. *Visnyk NU «Lvivska politekhnika». Kompiuterna inzheneriia ta informatsiini tekhnologii*. 2001. № 433. S. 11–22.
12. Zamkneni ta nelineini systemy : navch.posib. / A. I. Kubrak, O. A. Zhuchenko, O. V. Sytnikov. K. : NTUU KPI, 2012. 380 s.

Fylypchuk L. V., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

**SYNTHESIS OF LOCAL CONTROL SYSTEMS OF REAGENTS
CONSUMPTION IN REDUCTION OF TOXIC IMPURITIES AT WASTEWATER
IN A PERIODICAL ACTION REACTOR**

The article presents a solution to the problem of regulation of reagent consumption during the reduction of toxic impurities during wastewater treatment in periodical action reactors. The disadvantage of the existing dosing systems is that during the reduction reaction, the active reaction of the wastewater medium increases, which significantly reduces the reduction efficiency and requires the continuous maintenance of the pH value within the specified limits and the dosing of an excess amount of the reducing agent. Considering the interdependence of the processes of reduction and acidification for the control system, the most effective is the method of complex stepwise regulation of pH and Eh parameters, which consists in the stepwise, sequential dosing of reagents at each of the stages according to the measured values of the redox potential Eh and the active reaction of the pH medium with subsequent stabilization of the redox potential of water. The method of determining the parameters of the regulator in the feedback control system with step-by-step periodic adjustment of the parameters for the neutralization of hexavalent chromium in periodical action reactor has been developed. The technique allows determination of such values of the regulator parameters that allow the object to be transferred from one state to another in a given period of time with a given amount of reagent.

Keywords: wastewater treatment; control systems; automation; dosing of reagents; toxic impurities.