

УДК 681.54:628.34

<https://doi.org/10.31713/vt1202611>

Филипчук Л.В. [1; ORCID ID: 0000-0002-5262-6027],

к.т.н., доцент,

Филипчук В.Л. [1; ORCID ID: 0000-0001-5763-5398],

д.т.н., професор

Гаєвський В.Р. [1; ORCID ID: 0000-0003-4180-7436],

к.т.н., доцент

¹Національний університет водного господарства та природокористування,
м. Рівне

КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ РЕАГЕНТНОГО ОКИСНЕННЯ- ВІДНОВЛЕННЯ ДОМІШОК У ПРОМИСЛОВИХ СТИЧНИХ ВОДАХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У статті викладаються результати досліджень щодо створення автоматизованої системи реагентного окиснення та відновлення токсичних домішок, які знаходяться у багатокомпонентних стічних водах підприємств. Запропоновано вести контроль за дозуванням реагентів та процесом очищення за допомогою таких параметрів, як активна реакція (рН) та окисно-відновний потенціал (Eh) середовища. Характерною особливістю багатокомпонентних стічних вод є нестаціонарність стічних вод за складом і концентрацією домішок, а також зміна кінетики параметрів рН та Eh в процесі дозування реагентів. В результаті процес очищення протікає в умовах значної невизначеності параметрів. Рекомендовано автоматизоване керування процесом окиснення/відновлення, який включає поетапне імпульсне дозування реагентів у воду. На кожному етапі у воду дозують реагент для зміни рН, потім окисник або відновник для зміни Eh до деякого проміжного значення і витримка для закінчення хімічної реакції. Процес ведуть до поступового досягнення кінцевого Eh, необхідного для повного окиснення/відновлення домішок. Для керування процесом очищення запропоновано використання елементів штучного інтелекту. ШІ-технології дають змогу аналізувати великі масиви даних, виявляти закономірності та адаптивно керувати дозуванням реагентів. В таких умовах

найбільш ефективним може бути комбінований підхід до застосування ШІ. Базове регулювання виконує класичний PID чи MPC регулятор, а надбудова у вигляді штучного інтелекту – RL. Може використовуватись нечітка логіка чи експертні правила. Для впровадження таких систем ключовим є використання цифрових двійників для попереднього навчання та тестування алгоритмів.

Ключові слова: стічні води, забруднення, важкі метали, окиснення-відновлення, автоматизація, рН та Eh, штучний інтелект.

Постановка проблеми. Однією з важливих складових охорони довкілля є попередження скиду багатокомпонентних промислових стічних вод у водні басейни. Характерною ознакою таких стічних вод є наявність широкого спектру органічних домішок, мінеральних солей, комплексоутворюючих сполук, поверхнево-активних речовин, амонію, нітратних сполук тощо, а також нестаціонарність як за складом, так і за концентрацією забруднень.

Особливу групу домішок у промислових стічних водах складають токсичні окисно-відновні домішки, зокрема, шестивалентний хром, ціаніди, феноли, різні органічні речовини тощо. Основні з цих забруднень мають 1-3 класи небезпеки і надзвичайно негативно впливають на живі організми, оскільки мають кумулятивні та токсичні властивості [1].

Для детоксикації таких домішок, в першу чергу, використовують реакції окиснення-відновлення шляхом додавання відповідних хімічних реагентів [2], які змінюють такі параметри стічної води та величину окисно-відновного потенціалу (Eh) водного середовища та величину активної реакції (рН). Внаслідок цього токсичні домішки змінюються з утворенням нетоксичних продуктів або переходять у інший фазово-дисперсний стан (тверду речовину, газ).

Існуючий стан регулювання Eh у багатокомпонентних водних системах. Підвищення Eh проводиться з метою окиснення токсичних органічних домішок (фенолів, роданідів тощо), що можуть бути присутніми у багатокомпонентних металовмісних стічних водах, для перетворення відновних форм металів (заліза(II), олова(II) тощо) в окиснені, які мають значно меншу розчинність, ніж їх відновлені форми. Розповсюдженим є окиснення ціанідів (ціанідних сполук металів), які є надзвичайно токсичними. У більшості випадків



процеси окиснення краще протікають у лужному або нейтральному середовищі, що потребує додаткового підвищення рН стічної води.

В якості окисників та відновників використовують широкий спектр реагентів [3]. Зниження E_h проводиться, в першу чергу, з метою відновлення високотоксичних іонів шестивалентного хрому до менш токсичного тривалентного стану. Цей процес краще протікає у кислому середовищі, що потребує додаткового зниження рН стічної води. Найбільш розповсюджені відновники, такі як залізний купорос Fe_2SO_4 , має кислі властивості, а сульфід натрію Na_2S та сульфід натрію Na_2SO_3 – лужні властивості. Найбільш розповсюджені окисники, такі як похідні хлору, мають лужні властивості, тобто одночасно підвищують рН водного середовища. У свою чергу, супутнє регулювання величини рН середовища шляхом дозування кислот та лугів призводить відповідно до протилежної зміни.

Крім того, в процесі хімічної реакції відновлення найчастіше протікає підвищення рН середовища, а в процесі окиснення – зниження рН. У більшості випадків луги і окисники позитивно впливають на окиснення, тоді як кислоти та відновники гальмують цей процес. Відповідно, кислоти та відновники позитивно впливають на відновлення, а луги і окисники гальмують цей процес. Тобто, при проведенні реакцій окиснення-відновлення протікають комплексні хімічні процеси взаємного впливу величин рН та E_h води, що значно утруднює регулювання хімічними процесами.

Серйозною проблемою під час проведення окисно-відновних процесів є можливість утворення проміжних продуктів хімічних реакцій. Особливо небезпечними є процеси окиснення із застосуванням хлорвмісних реагентів, які найбільш розповсюджені при очищенні води від природних та антропогенних органічних домішок. В результаті протікання таких реакцій може утворюватися широкий спектр проміжних продуктів, таких як хлорорганічні сполуки, тригалогенметани, галогеноцтові кислоти та інші хлор- та бромвуглеводні, що скидаються разом з очищеною водою у водні басейни. Більшість цих проміжних речовин відносяться до 1 класу небезпечності і становлять значну загрозу для людини та живих організмів. Вони можуть проявлятися загальнотоксичною, канцерогенною, мутагенною та тератогенною дією [4].

Основними причинами їх утворення може бути недоокиснення органіки внаслідок низької окислювальної здатності реагентів, невідповідність кількості реагентів концентрації забруднюючих речовин, коливання концентрацій забруднень, складність контролю за дотриманням доз реагентів, наявність супутніх компонентів, що проявляють буферну дію при зміні рН та Eh середовища.

Ефективним засобом контролю та керування технологічним процесом очищення вод в таких умовах є застосування автоматизованих систем дозування реагентів. Найбільш поширеною системою є одноразове дозування окисників/відновників у стічну воду при підтриманні значення величини активної реакції середовища (рН) в оптимальних межах до досягнення у змішувачі-реакторі стану хімічної рівноваги. Однак це призводить до значної тривалості процесу очищення та перевитрати реагентів, оскільки ступінь руйнування домішок та закінчення процесу окиснення-відновлення визначається окремо в хімічних лабораторіях підприємств.

Оскільки величини Eh та рН взаємопов'язані між собою, то основним параметром, який визначає напрям та інтенсивність протікання окисно-відновної реакції, є нормальний окислювальний потенціал (E^0) окисника або відновника, що забезпечує відповідний окисно-відновний потенціал (Eh) у водному середовищі. Додатковим параметром, який створює оптимальні умови для найбільш ефективного протікання реакції є величина активної реакції водного середовища (рН). Тобто, з метою автоматизованого керування процесом реагентного окиснення та відновлення домішок у воді при проведенні окисно-відновного процесу необхідно контролювати ці два параметри стану стічної води, як об'єкту регулювання. Параметр Eh якісно та кількісно визначає напрямок протікання реакції окиснення-відновлення, а параметр рН додатково визначає умови найбільш ефективного протікання цих реакцій [5]. При цьому керуючими впливами є кількість та концентрація окисника\відновника для зміни Eh та кислоти\лугу для зміни рН.

Однак, як показують дослідження, у зв'язку з багатокомпонентністю води та складною залежністю між рН та Eh при введенні реагентів криві зміни рН і Eh мають значну нелінійність. Непрогнозованість зміни цих параметрів у зв'язку із значними коливаннями якісного та кількісного стану домішок у воді утруднює контроль та управління процесом окиснення-відновлення

домішок при дозуванні реагентів. Крім того, при безперервному приладовому контролю параметрів рН та Eh кількість значень цих показників може мати значну величину, що потребує складного аналітичного осмислення даних і на цій основі прийняття відповідних рішень щодо встановлення оптимальних параметрів дозування реагентів [6]. Тобто, в умовах постійної зміни кінетики процесу очищення, пов'язаної із коливанням складу та нестаціонарністю стічних вод за концентрацією і видом домішок, актуальним є розробка автоматизованої системи керування процесом очищення багатокомпонентних стічних вод від окисно-відновних токсичних домішок шляхом застосування елементів штучного інтелекту.

Мета досліджень полягає у розробці автоматизованої системи керування процесами окиснення-відновлення токсичних домішок у багатокомпонентних водних системах шляхом комплексного регулювання параметрів рН та Eh із використанням елементів штучного інтелекту.

Результати досліджень.

Процеси повного окиснення або відновлення домішок ефективно протікають тільки при досягненні деякого значення величини Eh водної фази [7]. При цьому важливим є підтримання рН в оптимальній для даної реакції області значень. Зміна рН за допустимі межі може призвести до значного гальмування процесів окиснення-відновлення, навіть до зупинки реакції, а також до виділення токсичних продуктів. Це потребує поряд з регулюванням Eh введення кислот або лугів для підтримки необхідних значень рН в допустимих межах. Наприклад, зниження рН нижче допустимого під час окиснення органічних домішок за допомогою окисника гіпохлориту натрію призводить до виділення при $\text{pH} < 6,8$ газоподібного хлору, що є небезпечним для обслуговуючого персоналу, а під час окиснення ціанідів – надзвичайно токсичного продукту хлорціану. В свою чергу, при $\text{pH} > 3,0$ відновлення хрому(VI) за допомогою сульфїту натрію протікає неефективно, а при більших рН – може навіть зупинитись. При наявності хрому(III) та активного хлору (окисника) проходить процес зворотного окиснення нетоксичного хрому(III) у токсичний хром(VI).

Як вказувалось вище, регулювання величин E_h та pH ускладнюється також тим, що сам окисник або відновник змінює pH середовища, що в свою чергу має зворотний вплив на величину E_h . Так, при окисненні забруднень можливе використання підлужуючих (гіпохлорит натрію $NaClO$) і підкислюючих (газоподібний хлор Cl_2) окисників та підлужуючих (сульфіт натрію Na_2SO_3) і підкислюючих (сульфат закису заліза $FeSO_4$) відновників. В результаті цього при додаванні газоподібного хлору pH середовища знижується, а при уведенні гіпохлориту натрію, сірковмісних відновників pH середовища підвищується з відповідним додатково протилежним підвищенням E_h у першому випадку і зниженням E_h у другому випадку. Внаслідок цього при одноразовому додаванні окисників або відновників досягнення необхідних значень E_h буде утрудненим або навіть неможливим і потребує дозування значно більших від стехіометричних кількостей окисників або відновників, необхідних для окиснення-відновлення домішок згідно хімічних реакцій. В результаті спостерігається значна перевитрата окисно-відновних реагентів, а у ряді випадків навіть введення у воду високих концентрацій окисників і відновників не дозволяє досягти необхідних значень величини E_h .

Крім того, хімічні процеси окиснення-відновлення та зміни pH потребують деякого часу для закінчення реакції при введенні порції реагенту. Якщо зміна величини pH протікає достатньо швидко (декілька десятків секунд), то зміна E_h особливо при наявності багатокомпонентності у стічних водах протікає значно довше (від декількох до десятків хвилин). Тому після введення дози окисника або відновника у стічну воду необхідний час для стабілізації цих параметрів після введення деякої дози реагенту. У таких випадках використовують змішувачі-реактори періодичної (непроточної) дії, тобто спочатку стічна вода накопичується в ньому, далі дозуються реагенти, протікає хімічний процес, після чого оброблена вода скидається.

Наприклад, зміна окисно-відновного потенціалу E_h при наявності у воді розчину органічної речовини та імпульсному дозуванні окисника $NaOCl$ наведена на рис. 1. Як видно, починаючи з E_h близько +500 мВ зміна E_h має значну пилкоподібність, що пояснюється окисненням сечовини під дією кожної порції уведеного окисника.

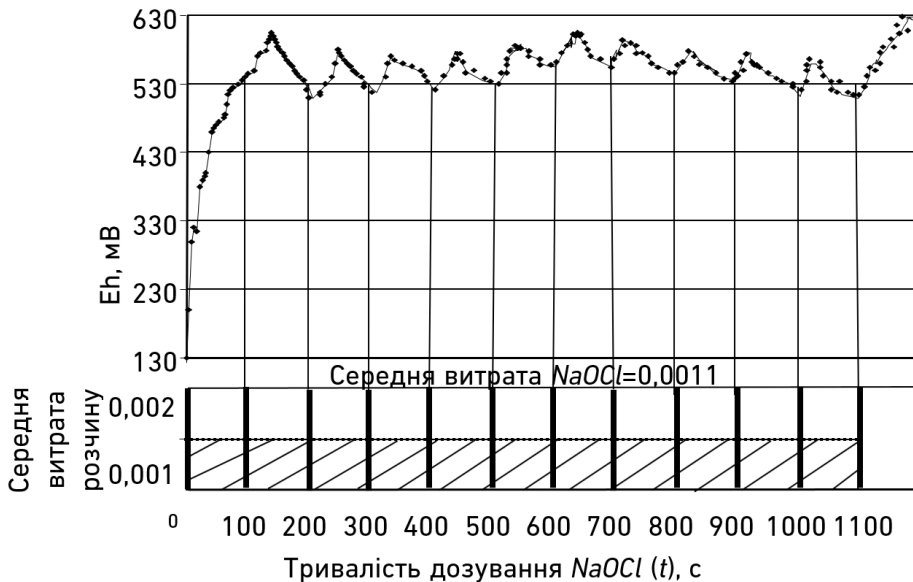


Рис. 1. Перехідна характеристика зміни Eh розчину при окисненні сечовини концентрацією 1 г/л під час імпульсного періодичного дозування 0,1 мл/л розчину 10 % $NaOCl$

Початок перехідного процесу – це практично стрибкоподібне зростання Eh від 210 до 410 мВ, далі (від 410 до 635 мВ). Зміна Eh має аперіодичний характер (може бути апроксимована диференціальним рівнянням порядку $n \geq 1$), а в діапазоні від 635 до 710 мВ - інтегруючою ланкою. Це суттєво нелінійний об'єкт, структура та параметри якого змінюються в процесі дозування реагенту.

Оскільки зміна Eh під час стабілізації може тривати достатньо значний час (параметр «пливе»), то недоцільно чекати повного закінчення цього процесу. Можна умовно визначити межу стабілізації величини Eh_i на кожному з етапів і далі здійснювати дозування реагентів. Тобто, процес проводиться в умовах невизначеності проміжних параметрів очищення з поступовим наближенням до кінцевої величини $Eh_{кін}$, яка забезпечує повне окиснення-відновлення домішок. Цю величину можна приймати експериментально або відповідно до нормального окислювального потенціалу (E^0) окисника/відновника, що забезпечує відповідний окисно-відновний потенціал (Eh) водного середовища.

Наприклад, окиснення ціанідів у вигляді сполук міді (рис. 2) проводилось у чотири етапи при таких параметрах: початкова концентрація ціанідів у стічній воді 40 мг/л; середнє значення рН = 10,0–10,5; концентрація гіпохлориту натрію $NaOCl$ 9%; концентрація гідроксиду натрію $NaOH$ 10%. Дозування гіпохлориту натрію здійснювалось до досягнення заданих проміжних значень Eh_i для кожного із етапів: $Eh_1 = 630$ мВ, $Eh_2 = 750$ мВ, $Eh_3 = 900$ мВ, $Eh_4 = Eh_{кін} = 1030$ мВ, які приймались заздалегідь виходячи із нормального потенціалу гіпохлоритного іону. Оптимальне значення величина рН підтримувалось не менше 10,5–11,0.

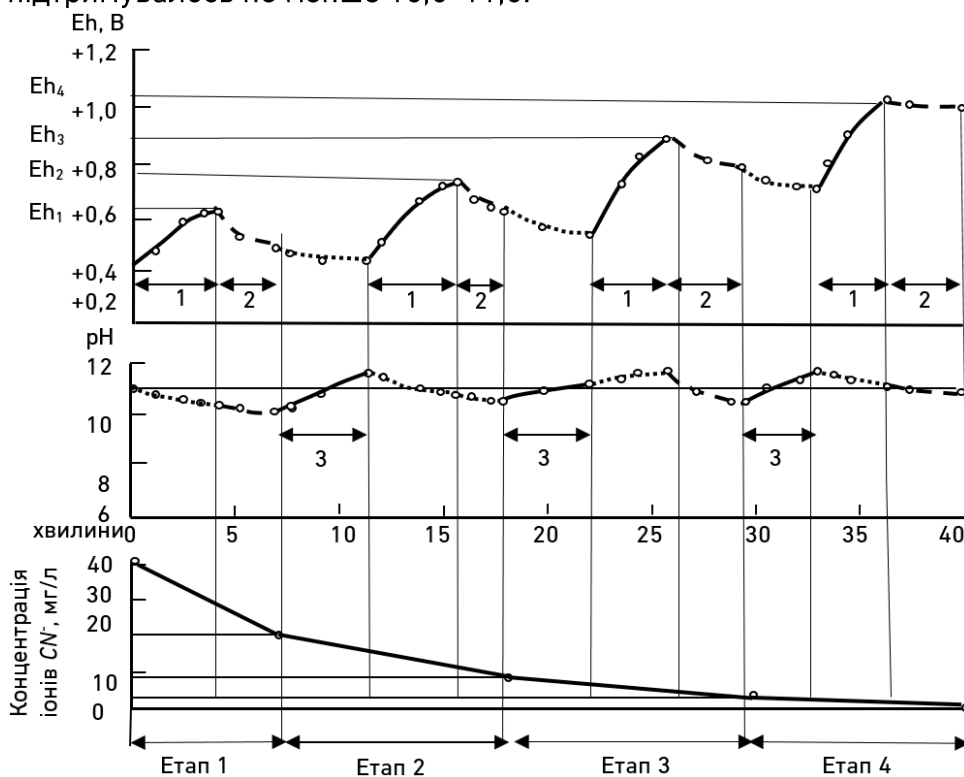


Рис. 2. Графіки перехідних процесів зміни величин Eh і рН при поетапному окисненні комплексних ціанідів міді лужним гіпохлоритом натрію та підлужування середовища гідроксидом натрію: 1 – період дозування окисника, 2 – період стабілізації Eh , 3 – період дозування луку

Тобто, величини рН та Eh можуть бути використані, як параметри стану, в системі керування процесом знешкодження

158



домішок при очищенні стічних вод в умовах невизначеності проміжних параметрів очищення з поступовим наближенням до кінцевої величини $E_{h_{кін}}$, яка забезпечує повне окиснення-відновлення домішок. В таких випадках доцільним є застосування способу комплексного багатоступінчастого керування процесом очищення стічних вод у реакторах-змішувачах періодичної дії, який полягає у поетапному та послідовному на кожному із етапів дозуванні реагентів за вимірними значеннями окисно-відновного потенціалу E_h та активної реакції середовища pH з наступною стабілізацією окисно-відновного потенціалу води на кожному з етапів.

Оскільки параметри E_h та pH є взаємопов'язаними, то керування ними є прикладом багатоканальної нелінійної системи, яка змінюється в часі і перебуває в умовах невизначеності. Класичні регулятори (PID, каскадні схеми) не завжди справляються з такими умовами, особливо коли склад стоків різко змінюється.

Ситуація є класичною для мультिवаріантного (багатоканального) процесу регулювання: на вході стічна вода з параметрами pH та E_h , які змінюються, а на виході ми хочемо тримати їх у допустимих межах при дозуванні реагентів. Оскільки pH та E_h взаємозв'язані, то з точки зору автоматизації це нелінійна, динамічна, невизначена система. Саме тут на допомогу може прийти штучний інтелект-ШІ (Artificial intelligence–AI), який може працювати як надбудова над базовим контуром керування [8-11].

Так, в цьому випадку доцільним може бути застосування «гібридного підходу» (Hybrid Approach). Принцип його полягає в поєднанні класичного регулятора з коригуванням від ШІ: PID або MPC тримає pH та E_h «близько до норми», а ШІ-модуль аналізує тренди, невизначеність, зовнішні фактори (наприклад, зміна складу стоків) і підлаштовує коефіцієнти регулятора. Зокрема, PID-регулятор регулює pH , ШІ дає «рекомендований зсув» дозування, щоб E_h не виходив за прийнятні межі. Часто застосовується гібридний підхід. У ньому класичний регулятор (наприклад, PID або MPC) забезпечує базове утримання параметрів у межах, а штучний інтелект виступає як коректор. ШІ аналізує поведінку системи, виявляє тенденції або аномалії та підлаштовує налаштування регулятора під нові умови. Наприклад, PID-контур може стабілізувати pH , тоді як модуль

штучного інтелекту дає коригувальні команди, щоб не допустити виходу E_h за межі. Це підхід, який поєднує надійність класики з гнучкістю інтелектуальних методів.

Також можливе використання алгоритмів підкріпленого навчання (Reinforcement Learning, RL), який є одним із перспективних напрямів в цьому випадку. У такому підході система діє як "агент", який навчається на основі спроб і помилок. Він змінює дозування реагентів, спостерігає реакцію системи та отримує "нагороду" чи "штраф" залежно від того, чи залишилися параметри в допустимих межах. З часом алгоритм знаходить оптимальну стратегію керування навіть за складних взаємодій між pH і E_h . Однак безпечно впровадження такого підходу потребує використання цифрового двійника – комп'ютерної моделі процесу, де RL може тренуватися без ризику для реального обладнання.

Інший підхід – це широко відома нечітка логіка (fuzzy logic). Це метод, де замість точних математичних рівнянь формулюються правила у вигляді "якщо–то". Наприклад: якщо pH занадто низький, а E_h високий, то слід зменшити подачу кислоти та знизити дозу окисника. Якщо ж pH у нормі, але E_h падає, потрібно збільшити подачу окисника.

Такі правила легко пояснити оператору, вони інтуїтивні та добре працюють в умовах невизначеності. Недоліком є те, що набір правил потрібно створювати або вручну на основі досвіду технологів, або навчати їх із отриманих даних.

Близьким до нечіткої логіки підходом є експертні системи. Це програмні системи, у які закладено знання від досвідчених спеціалістів. Вони аналізують ситуацію за вхідними параметрами, враховують тренди й пропонують рішення, які в звичайній практиці прийняли б оператори. Такий варіант може працювати як "радник", що допомагає оператору, або як автономний модуль управління. Перевага цього методу – швидкість впровадження, недолік – менша гнучкість у випадку нових, нетипових умов.

Ще один можливий сучасний напрям – модельно-прогнозне керування з використанням ШІ (AI-MPC). У класичному MPC потрібна точна математична модель процесу, але у випадку стічних вод це складно. Тому прогноз робиться за допомогою машинного навчання – нейронних мереж чи гауссових процесів. Такі моделі можуть передбачати, як зміняться pH та E_h у відповідь на дозування реагентів, і MPC використовує ці прогнози, щоб знайти оптимальні дії

на кілька кроків уперед. Це особливо корисно, адже хімічні реакції мають затримки, і система повинна діяти на випередження.

У підсумку, для задачі регулювання рН та Eh у стічних водах найбільш ефективним може бути комбінований підхід. Базове регулювання виконує класичний PID чи MPC, а надбудова у вигляді штучного інтелекту – RL, нечітка логіка чи експертні правила – забезпечує адаптивність до змін складу стоків. Для безпечного впровадження таких систем ключовим є використання цифрових двійників для попереднього навчання та тестування алгоритмів. Це дозволяє поєднати стабільність традиційних методів і гнучкість сучасних інтелектуальних рішень.

На підставі досліджень запропонована мікропроцесорна автоматизована двоканальна система керування процесом очищення води шляхом поетапного комплексного регулювання параметрів Eh та рН в умовах їх відносної невизначеності з використанням штучного інтелекту (ШІ), структурна схема якої наведена на рис. 4.

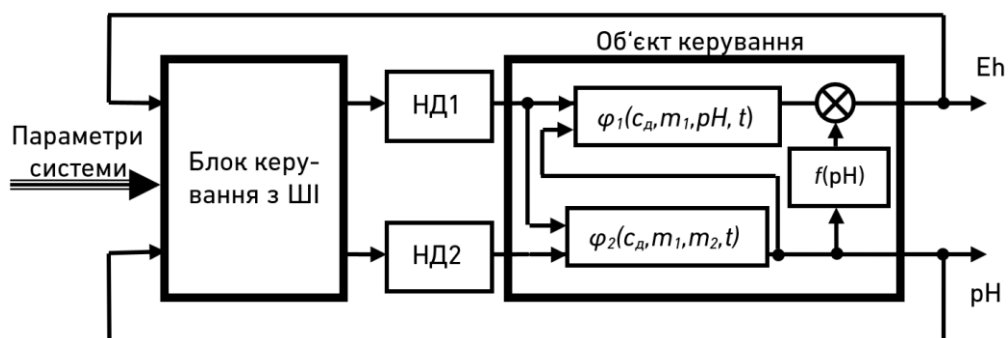


Рис. 4. Загальна структурна схема системи керування процесом регулювання рН та Eh з використанням ШІ: НД1 – керований насос-дозатор окисника\відновника; НД2 – керований насос-дозатор кислоти\лугу; φ_1 – функція перетворення процесу окиснення\відновлення; φ_2 – функція перетворення процесу підкислення\підлужування; $f(pH)$ – залежність Eh від рН; c_d – концентрація домішок; m_1 – маса доданого окисника\відновника; m_2 – маса доданої кислоти\лугу; t – час.

Вона включає блок переробки інформації з елементами штучного інтелекту (ШІ), що включає такі операції, як збір, накопичення та аналіз даних зміни параметрів рН та Eh при дозуванні реагентів на кожному із етапів, кількість яких також задаються. Первинні дані надаються на підставі лабораторних досліджень. Програмно вводяться первинну кількість етапів, а також обмеження зміни величин рН та Eh на етапах та кінцеве значення Eh, при якому забезпечується повне окиснення-відновлення домішок; параметри кожного із етапів з можливістю зміни їх кількості в залежності від характеру зміни рН та Eh; обмеження тривалості дозування і стабілізації на кожному з етапів.

Штучний інтелект під час кожного періодичного накопичення стічної води у змішувачі-реакторі аналізує первинні дані, а потім по мірі надходження нових даних від датчиків рН та Eh шляхом їх порівняння з первинними даними формує кількість етапів та межі зміни рН та Eh на кожному з етапів та тривалість стабілізації. При цьому на базі накопичених даних відправним пунктом для формування параметрів очищення є початкові значення рН та Eh у змішувачі-реакторі після повного його наповнення водою, а також первинні дані: кількість етапів, тривалість дозування реагентів на кожному з етапів та стабілізації рН і Eh та кінцеві їх значення.

Розроблена автоматизована системи керування процесом очищення стічних вод з використанням елементів штучного інтелекту кореспондується з характерними рисами розвитку четвертої промислової революції ([Industry 4.0](#)). Вона включає повністю автоматизовані виробництва, на яких керівництво всіма процесами здійснюється в режимі реального часу, з урахуванням мінливих зовнішніх умов із можливістю самоналагодження і самонавчання [12].

Висновки

1. Характерною особливістю очищення багатокомпонентних стічних вод підприємств від окисно-відновних токсичних домішок є нестаціонарність стічних вод за складом і концентрацією домішок, а також зміна кінетики параметрів рН та Eh в процесі дозування реагентів.

2. Запропонована автоматизована системи керування процесом очищення шляхом поетапного регулювання параметрів рН та Eh в умовах їх відносної невизначеності, що забезпечує



підвищення якості та ефективності очищення, в тому числі зменшення тривалості процесу та витрати реагентів.

3. Використання в таких системах штучного інтелекту дозволяє значно підвищити ефективність керування процесом очищення води за рахунок оптимізації технологічних параметрів у реальному часі. ШІ-технології дають змогу аналізувати великі масиви даних, виявляти закономірності та адаптивно керувати дозуванням реагентів.

4. Для задачі регулювання рН та Eh у стічних водах найбільш ефективним може бути комбінований підхід із застосування ШІ. Базове регулювання може виконувати класичний PID чи MPC регулятор, а надбудова у вигляді штучного інтелекту – RL, а також нечітка логіка чи експертні правила, що забезпечує адаптивність до зміни складу стоків. Для безпечного впровадження таких систем ключовим є використання цифрових двійників для попереднього навчання та тестування алгоритмів.

1. Наказ від 22.03.2012 № 627 Про затвердження Вимог до роботодавців щодо захисту працівників від шкідливого впливу хімічних речовин. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98891. 2. Филипчук В.Л. Очищення металовмісних стічних вод промислових підприємств: Монографія. – Рівне: УДУВГП, 2004, 232 с. 3. Филипчук В. Л., Древецький В.В., Филипчук Л.В., Клепач М.І.. Автоматизоване керування природоохоронними системами очищення металовмісних стічних вод (монографія). – Рівне: Овід, 2017. – 288 с. 4. Стискал О.А., Петрук В.Г. Небезпека побічних продуктів хлорування у питній воді для живих систем. Науково-практичний журнал «Екологічні науки», 2017, №9 – С. 154-160. 5. Филипчук В.Л. Про можливість використання окислювально-відновного потенціалу для контролю та регулювання процесами фізико-хімічної очистки води. Вісник РДГУ «Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво». –Рівне, 1999. С.305-310. 6. Филипчук Л.В. Автоматизація процесу регулювання рН та Eh при очищенні металовмісних стічних вод в оборотних системах водопостачання підприємств. Вісник Інженерної академії України. – Київ, 2013, вип. 1. С.204-208. 7. Филипчук Л.В. Моделювання роботи автоматизованої системи керування процесом реагентного відновлення токсичних домішок в непроточних умовах. Перспективні технології та прилади: збірник наукових праць. Луцьк: ЛНТУ, 2022. Вип. 20 (вересень, 2022). С. 101-107. 8. Liu, Y., Xie, Q., Ma, D., Shen, Y., Zhang, J., Chen, H., & Duan, J. Real-Time Control of an A²/O WWTP Using

LSTM-Enhanced MPC. Water, 2023, 15(15), 2724. <https://doi.org/10.3390/w15152724/>. **9.** Chen, K., Zhang, Z., & Huang, B. Optimal control towards sustainable wastewater treatment: multi-agent deep reinforcement learning. Chemosphere, 2021. **10.** Kumar, S. S., & Latha, K. A supervisory fuzzy logic control scheme to improve effluent quality of a wastewater treatment plant. Water Science & Technology, 2021, 83(4), 924–939. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.583>. **11.** Rodríguez-Alonso, C., Pena-Regueiro, I., & García, Ó. Digital Twin Platform for Water Treatment Plants Using Microservices Architecture. Sensors, 2024, 24(5), 1487. <https://doi.org/10.3390/s24051487>. **12.** Мельник Л.Г. Четверта промислова революція: передумови та зміст. Актуальні проблеми економіки. №9(183), 2016. С.26-30.

REFERENCES:

1. Nakaz vid 22.03.2012 № 627 Pro zatverdzhennya Vimog do robotodavciv shodo zahistu pracivnikov vid shkidlivogo vplivu himichnih rechovin. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98891. **2.** Filipchuk V.L. Ochishennya metalovmisnih stichnih vod promislovih pidpriyemstv: Monografiya. – Rivne: UDUVGP, 2004, 232 s. **3.** Filipchuk V. L., Dreveckij V.V., Filipchuk L.V., Klepach M.I.. Avtomatizovane keruvannya prirodohoronnimi sistemami ochishennya metalovmisnih stichnih vod (monografiya). - Rivne: Ovid, 2017. – 288 s. **4.** Stiskal O.A., Petruk V.G. Nebezpeka pobichnih produktiv hloruvannya u pitnij vodi dlya zhivih sistem. Naukovo-praktichnij zhurnal «Ekologichni nauki», 2017, №9 – S. 154-160. **5.** Filipchuk V.L. Pro mozhlivist vikoristannya okislyuvalno-vidnovnogo potencialu dlya kontrolyu ta regulyuvannya procesami fiziko-himichnoyi ochistki vodi. Visnik RDGU «Gidromelioraciya ta gidrotehniche budivnictvo». – Rivne, 1999. S.305-310. **6.** Filipchuk L.V. Avtomatizaciya procesu regulyuvannya rN ta Eh pri ochishenni metalovmisnih stichnih vod v oborotnih sistemah vodopostachannya pidpriyemstv. Visnik Inzhenernoyi akademiyi Ukrayini. – Kiyiv, 2013, vip. 1. S.204-208. **7.** Filipchuk L.V. Modelyuvannya roboti avtomatizovanoyi sistemi keruvannya procesom reagentnogo vidnovlennya toksichnih domishok v neprotochnih umovah. Perspektivni tehnologiyi ta priladi: zbirnik naukovih prac. Luck: LNTU, 2022. Vip. 20 (veresen, 2022). S. 101-107. **8.** Liu, Y., Xie, Q., Ma, D., Shen, Y., Zhang, J., Chen, H., & Duan, J. Real-Time Control of an A²/O WWTP Using LSTM-Enhanced MPC. Water, 2023, 15(15), 2724. <https://doi.org/10.3390/w15152724/>. **9.** Chen, K., Zhang, Z., & Huang, B. Optimal control towards sustainable wastewater treatment: multi-agent deep reinforcement learning. Chemosphere, 2021. **10.** Kumar, S. S., & Latha, K. A supervisory fuzzy logic control scheme to improve effluent quality of a wastewater treatment plant. Water Science & Technology, 2021, 83(4),

924–939. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.583>. **11.** Rodriguez-Alonso, C., Pena-Regueiro, I., & Garcia, o. Digital Twin Platform for Water Treatment Plants Using Microservices Architecture. *Sensors*, 2024, 24(5), 1487. <https://doi.org/10.3390/s24051487>. **12.** Melnik L.G. Chetverta promislava revoluciya: peredumovi ta zmist. Aktualni problemi ekonomiki. №9(183), 2016. S.26-30.

Fylypchuk L. V. ^[1; ORCID ID: 0000-0002-5262-6027],

Candidate of Engineering (PhD), Associate Professor,

Fylypchuk V. L. ^[1; ORCID ID: 0000-0001-5763-5398],

Doctor of Engineering, Professor

Gayevski V. R., ^[1; ORCID ID: 0000-0003-4180-7436]

(PhD), Associate Professor

¹National University of Water and Environmental Engineering, Rivne

CONTROL OF REAGENT OXIDATION-REDUCTION PROCESSES OF IMPURITIES IN INDUSTRIAL WASTEWATER USING ELEMENTS OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE

The article presents the results of research on the creation of an automated system for reagent oxidation-reduction of toxic impurities found in multicomponent wastewaters of enterprises. It is proposed to control the dosing of reagents and the purification process using such parameters as the active reaction (pH) and the oxidation-reduction potential (Eh) of the medium. A characteristic feature of multicomponent wastewater is the non-stationarity of wastewater in terms of composition and concentration of impurities, as well as a change in the kinetics of the pH and Eh parameters during the reagent dosing process. It should be taken into account that the reagents themselves affect the parameters of the medium, which change during the course of chemical reactions, and pH and Eh also mutually influence each other in opposite directions. As a result, the purification process occurs under conditions of significant uncertainty of the parameters. Automated control of the oxidation/reduction process, which includes a step-by-step pulse dosing of reagents into

water, is recommended. At each stage, a reagent is dosed into the water to change the pH, then an oxidant or reductant to change Eh to some intermediate value and a holding time to complete the chemical reaction. The process leads to the gradual achievement of the final Eh, necessary for complete oxidation/reduction of impurities. Since the cleaning conditions are constantly changing and it is necessary to make decisions with a significant number of pH and Eh parameter values, it is proposed to use artificial intelligence elements to control the cleaning process. AI technologies make it possible to analyze large data sets, identify patterns and adaptively control the dosing of reagents. In such conditions, a combined approach to the use of AI may be the most effective. The basic regulation is performed by a classic PID or MPC controller, and the superstructure in the form of artificial intelligence is RL. Fuzzy logic or expert rules can be used to ensure the adaptability of the system to changes in the composition of wastewater and parameters of the cleaning process. The key to implementing such systems is the use of digital twins for preliminary training and testing of algorithms.

***Keywords:* wastewater, pollution, heavy metals, oxidation-reduction, automation, pH and Eh, artificial intelligence**

Отримано: 29 січня 2026 року
Прорецензовано: 1 березня 2026 року
Прийнято до друку: 27 березня 2026 року



© 2026 [Fylypchuk L. V. Fylypchuk V. L., Gayevski V. R.]. Licensee [NUWEE]. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC) license (creativecommons.org).