

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

## **РЕГУЛЮВАННЯ рН ПРИ ОСАДЖЕННІ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ШЛЯХОМ ІМПУЛЬСНОГО ДОЗУВАННЯ РЕАГЕНТІВ В АВТОМАТИЗОВАНИХ УСТАНОВКАХ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ**

Під час реагентного осаджування іонів важких металів характерною особливістю процесу є виникнення пилкоподібності зміни рН розчинів, яка спостерігається на ділянці кривої титрування водного середовища. Тривалість стабілізації рН залежить від концентрації лугу і становить у середньому 15–20 с. На водоочисних станціях для регулювання рН промислових стічних вод використовують системи автоматизованого введення реагентів з постійною дозою, незалежною від рН стічної води і постійною дозою, залежною від рН. Внаслідок пилкоподібності не завжди забезпечуються оптимальні для осадження металів величини рН, які коливаються у вузькій області значень. Це призводить до погіршення ефективності осадження важких металів. Для покращення ефективності очищення води доцільно застосовувати системи автоматизації на базі ПІД-регулятора, які передбачають імпульсне дозування реагентів та стабілізацію рН стічної води після введення кожної порції реагенту.

**Ключові слова:** важкі метали; осадження; пилкоподібність зміни рН; автоматизовані системи; ПІД-регулювання.

**Вступ.** Для очищення промислових стічних вод від іонів важких металів (ІВМ) найбільш поширеним методом є їх осадження за допомогою лужних реагентів. Кожен метал має свою величину рН осадження, яка може коливатись у вузькій області значень цього параметра. При осадженні суміші металів, що характерно для металовмісних стічних вод встановлюється «компромісна» величина рН, яка забезпечує мінімальну концентрацію металів в очищеній воді (таблиця) [1].

Загальна кількість лугу ( $L$ ), яку потрібно додати для осадження іонів важких металів, складається з витрат на нейтралізацію вільної кислоти ( $L_{вк}$ ), нейтралізацію слабких кислот або солей ( $L_{ск}$ ),

осадження іонів важких металів ( $L_{oc}$ ) та створення деякого надлишкового значення рН ( $L_{pH}$ ), яке забезпечує повне осадження ІВМ:

$$L_{заг} = L_{вк} + L_{ск} + L_{oc} + L_{pH}.$$

Таблиця

Значення рН підлужування води для осадження іонів важких металів

Іони металів	Технологічні рН підлужування	Необхідність нейтралізації очищеної води
Залізо(III), мідь(II), хром(III)	Не менше 8.2	При рН більше 9.0
Хром(III) при наявності хлоридів	Не менше 8.2 і не більше 10.2	При рН більше 9.0
Залізо(II), нікель(II), кадмій(II)	Не менше 10.0	Потрібне
Суміш всіх металів	Не менше 9.8 і не більше 10.2	Потрібне

Нині найбільш практичною методикою визначення потрібної дози реагенту для регулювання рН є побудова кривих титрування з подальшим отриманням серії кінетичних залежностей.

Наведені методики розроблено для випадків зміни характеристик стічної води за залежностями, які монотонно міняються і не мають стрибків рН. При лінійній формі кривої титрування і стабільних вихідних характеристиках стічної води доза реагенту для досягнення потрібної зміни рН стічної води на одну одиницю є сталою, залежить від значень початкового  $pH_n$  та кінцевого  $pH_k$ , кількості потрібного для цієї зміни рН реагенту ( $\Delta V_{pH}$ ) і може бути визначена за формулою

$$D_p = \frac{V_{pH_k} - V_{pH_n}}{pH_k - pH_n} = \frac{\Delta V_{pH}}{\Delta pH}. \quad (1)$$

При цьому зазначається, що при рН води є нескладною задачею, оскільки вона зводиться до дозування реагенту у значних об'ємах [2]. Однак, як показує практика, в багатьох випадках навіть при застосуванні періодичної нейтралізації стала доза реагенту не дозволяє досягти потрібної точності значень рН. Якщо при цьому додатково спостерігаються значні флуктуації вихідних параметрів стічної води (рН, концентрацій важких металів та інших домішок), то зазначений вище підхід призводить до суттєвих помилок в автоматизованому регулюванні рН за допомогою сталої дози

дужного реагенту. Тому доцільним є використання змішувачів-реакторів періодичної дії та автоматизованих систем дозування реагентів із дозою, що змінюється залежно від рН водного середовища [3; 4].

**Існуючий стан автоматизованого регулювання рН при осадженні ІВМ.** На цей час на вітчизняних водоочисних станціях для регулювання рН промислових стічних вод використовують прості системи уведення реагентів: з постійною дозою, незалежною від рН стічної води і постійною дозою, залежною від рН стічної води. Перший варіант застосовують для стічної води із строго визначеними стабільними характеристиками і для металовмісних стічних вод, в яких концентрація важких металів постійно коливається, є неприйнятним. Однак, незважаючи на істотні недоліки, на практиці він є найбільш поширеним і використовується на 80–90% водоочисних станцій. У другому варіанті реагент дозується із постійною дозою, виключаючись при досягненні потрібного значення рН води. Цей варіант використовується на 10–20% вітчизняних водоочисних станцій. Його доцільніше застосовувати для сильнозабруднених металовмісних стічних вод, зокрема відпрацьованих розчинів і концентратів, характеристики яких змінюються протягом тривалого часу [6].

Для малозабруднених металовмісних стічних вод, які складають основну кількість стоків підприємств і характеризуються значними коливаннями вихідних характеристик, особливо при відсутності накопичувачів-усереднювачів великих об'ємів, найчастіше рекомендуються пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД) регулятори різних типів. Однак, у зв'язку із складністю і високою вартістю обладнання, ПІД-регулювання на вітчизняних водоочисних станціях застосовується досить рідко. На промислових підприємствах Східної і Західної Європи воно є основним і має потенційно широку перспективу на вітчизняному ринку у зв'язку з високими національними вимогами до якості очищеної води по іонам важких металів. Це пояснюється тим, що ПІД-регулятори в принципі можуть забезпечити точні значення рН, потрібні для повного осадження іонів важких металів або протікання необхідних хімічних реакцій, і тим самим, досягнення високого ступеня очищення металовмісних стічних вод [6].

Водночас у реальних умовах при використанні другого і третього варіантів регулювання рН металовмісних стічних вод виникає чимало технологічних проблем. Це обумовлюється тим, що

насоси-дозатори поршневого типу, які на сьогодні набули найбільшого поширення на станціях водоочищення, подають реагенти сталими порціями, величина яких залежить від характеристики дозатора. Зміна продуктивності дозаторів проводиться тільки за рахунок регулювання швидкості (імпульсу) подачі заздалегідь визначеної для даного дозатора порції реагенту.

При коливаннях вихідних характеристик стічної води, таких як кислотність, лужність, концентрації важких металів та інше, подача реагенту сталими порціями може призвести до суттєвих помилок у регулюванні рН стічної води, особливо у змішувачах невеликих об'ємів, розрахованих на рекомендовану середню тривалість змішування 5–10 хвилин [7; 8]. Застосування у таких умовах найбільш надійних САР, зокрема комбінованих та інших, дає можливість дотримання усереднених, необхідних для очищення значень рН обробленої стічної води. Однак величина рН може коливатись біля середніх значень у досить широкій області, що призводить до зниження якості очищення на спорудах для розподілу фаз і потребує значного усереднення обробленої стічної води перед цими спорудами.

Так, при осадженні іонів важких металів із кислих стічних вод потрібне кропітке дозування лугу до величини рН 9.8–10.2, необхідного для повного осадження суміші іонів важких металів. Додавання сталої порції реагенту у більшості випадків призводить до передозування лугу, що викликає повторне розчинення утворених гідроксидів внаслідок амфотерності металів у лужному середовищі. Передозування лугу обумовлюється тим, що кількість лугу для зміни рН у перехідній області може бути у декілька десятків разів менша ніж у граничній кислій або лужній області.

Крім того, інтервал між подачею порцій реагенту може бути недостатнім для стабілізації рН і протікання хімічної реакції утворення гідроксидів. Водночас недостатнє підвищення рН стічної води (на 0,2–0,3 одиниці рН нижче заданої величини) призводить до недоосадження іонів металів. Це пов'язано з тим, що при дослідженні кривих титрування вони будуються за осередненими значеннями рН. Ці залежності не враховують флуктуаційні зміни цього параметра при періодичному дозуванні реагенту насосом-дозатором, які пов'язані із необхідністю стабілізації рН після уведення кожної порції реагенту. Тобто при регулюванні рН металовмісних багатокомпонентних стічних вод за допомогою САР потрібне використання спеціальних технологічних прийомів

дозування хімічних реагентів, підбору потрібної концентрації реагенту в залежності від характеру зміни рН стічної води та параметрів насоса-дозатора.

**Метою досліджень** є дослідження кінетичних характеристик зміни рН під час осадження важких металів при імпульсному дозуванні реагентів.

**Методика проведення досліджень.** Експериментальні дослідження виконано для аналізу статичних (за кількістю уведених реагентів) та динамічних (за витратою реагентів) характеристик процесів очищення стічних вод, подальшого синтезу локальних систем регулювання показника рН та визначення параметрів автоматизованої мікропроцесорної системи комплексного багатоступінчастого керування процесом шляхом поетапного (імпульсного) регулювання рН.

При проведенні досліджень застосовувалися розчини солей важких металів та зразки багатокомпонентних металовмісних стічних вод. Лабораторні досліди по вилученню іонів важких металів при їх осадженні проводились при підвищенні та пониженні рН середовища, наступному фільтруванні обробленої води на паперовому фільтрі «біла стрічка» та вимірюванні концентрації IBM у фільтраті. Перед вимірюванням проводилось попереднє повне розчинення осаду у стічній воді шляхом зниження рН (додаванням до нього соляної кислоти). Величина рН обробленої води після імпульсного дозування порції реагенту вимірювалась потенціометричним методом після стабілізації значень цих параметрів. Вимірювання проводилось на сертифікованих і повірених приладах фірми «Prominent», зокрема переносному вимірювальному пристрої Portames, первинних вимірювальних перетворювачах рН «PHES 112 FE 301 S» (діапазон 1–12 од., робоча температура 0–60° С, макс. тиск 3 атм.) та Eh «RHES-Pt-FE 301 B» (робоча температура 0–60° С, макс. тиск 3 атм.), вторинних вимірювальних пристроях «DULCOMETER Compact».

Лабораторні дослідження зміни рН та Eh водного середовища проводились у змішувачі-реакторі періодичної дії. Вимірювання зазначених параметрів проводилось на іономірі ЭВ-74.

Як лабораторний механічний реактор-змішувач періодичної дії був прийнятий скляний циліндричний стакан об'ємом 200 мл, розчин в якому обертався за допомогою електромагнітної мішалки.

Електроди для вимірювання рН (скляний електрод ЭСЛ-43-07), Eh – платиновий ЭПВ-1) та порівнювальний (хлорсрібний електрод ЭВЛ-1М.3.1) з термокомпенсацією, що підключені до

іономіру, розміщені на відстані половини радіусу основи ємкості від центру та занурені на глибину половини висоти розчину, що знаходилась у стакані. Дозування реагентів відбувалось в точку, що знаходиться на відстані половини радіусу основи ємкості від центру в діаметрально протилежній стороні від точки розміщення вимірювальних електродів рН та Eh.

У якості вихідної води для приготування модельних розчинів була використана водопровідна вода, яка має природну карбонатну буферність і середню жорсткість 6–9 ммоль/л. При моделюванні осадження металів у водопровідній воді попередньо розчинялась сіль з важкими металами (зокрема,  $NiSO_4$  з концентрацією іонів нікелю 50 мг/л, який має високе рН осадження 9,5–10,0). При необхідності проводилась корекція початкового значення рН кислотою  $HCl$ . Під час проведення досліджень зміни рН до змодельованої води імпульсно (порціями) піпеткою додавалась  $HCl$  або  $NaOH$ . Після кожної порції подачі реагенту витримувався час, необхідний для стабілізації параметра рН і замірювалась його величина після встановлення стаціонарного значення. Витрата реагенту визначалась шляхом усереднення імпульсного дозування. Середнє значення витрати реагенту визначалось як відношення маси реагенту, доданого імпульсно, на загальну тривалість дозування.

**Результати досліджень.** Як показали дослідження, характерною особливістю процесу є пилкоподібність зміни рН розчинів. При підлучуванні водопровідної води 0,1 н розчином  $NaOH$  на початку перехідного процесу спостерігаються пилкоподібні зміни рН після уведення кожної порції лугу (рис. 1).

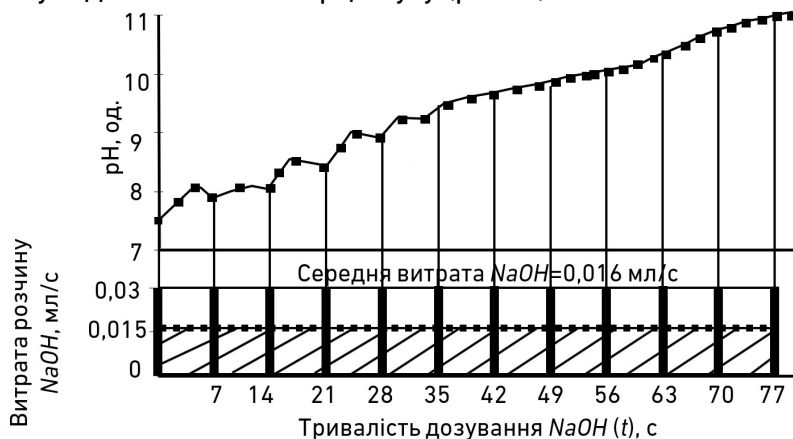


Рис. 1. Перехідна характеристика зміни рН водопровідної води при імпульсному дозуванні 0,1 мл/л 0,1 н розчину  $NaOH$

Причиною пилкоподібності є буферність води, що обумовлена наявністю карбонатних солей кальцію та магнію, тобто жорсткістю води, яка при підвищенні рН після уведення кожної порції луѓу починає зменшуватись внаслідок зв'язування гідроксильних іонів гідрокарбонатом кальцію і осадженням карбонату кальцію [9]. При подальшому підвищенні рН пилкоподібні зміни зникають внаслідок накопичення луѓу, водній системі потрібно менше часу для зміни рН, оскільки солі кальцію були вже попередньо осаджені. Починаючи із рН = 9,5, починається осадження гідроксиду магнію, що також спричиняє зміну рН після кожної порції введеного  $NaOH$  і відповідно пилкоподібність кривої. Усереднена по витраті реагенту перехідна характеристика зміни рН може бути апроксимована інтегруючою ланкою.

При дозуванні 0,01 н розчину  $NaOH$  підлужування водопровідної води було слабкішим ніж у попередньому випадку, що дозволяє точніше прослідкувати за зміною рН (рис. 2). Як видно на графіку перехідного процесу, майже на всій його ділянці до рН 8,2–8,4 і далі після рН 9,3–9,5 є також пилкоподібні коливання із значно меншою амплітудою і періодом внаслідок осадження гідроксиду магнію згідно з рівнянням 2.

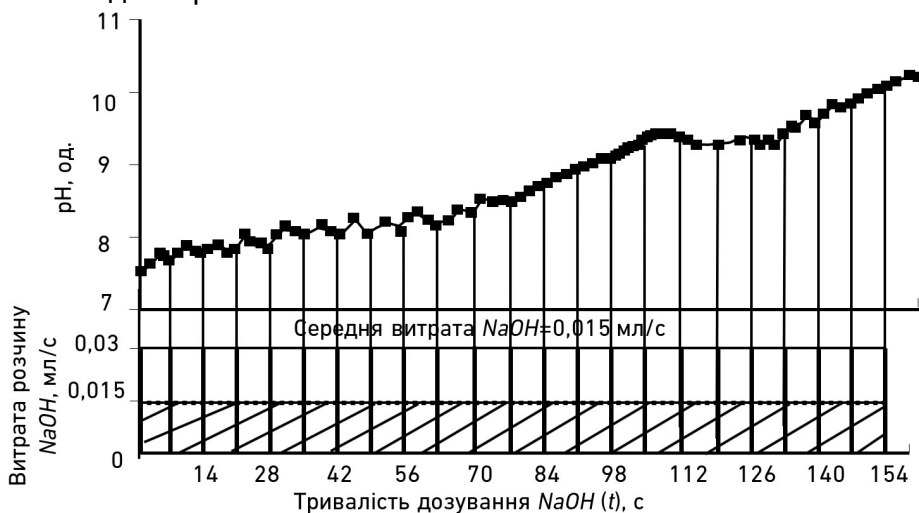
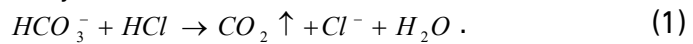


Рис. 2. Перехідна характеристика зміни рН водопровідної води при імпульсному періодичному дозуванні 0,1 мл/л 0,01 н розчину  $NaOH$

Тобто зменшення концентрації розчину дозволяє знизити амплітуду коливань рН, однак значно збільшує тривалість процесу дозування реагенту до заданого значення рН. В результаті

підлужування загальна жорсткість води знижувалась в середньому до 0,6–0,8 ммоль/л.

Зміна рН при підкисленні водопровідної води 0,01 н розчином  $HCl$  показує, що на початку перехідного процесу рН знижується повільно. Причиною цього є карбонатна буферність, яку обумовлює наявність гідрокарбонатних іонів ( $HCO_3^-$ ), які при підкисленні переходять у вуглекислоту ( $CO_2$ ):



В середині перехідного процесу після рН 5,8–6,2 рН різко знижується внаслідок зменшення буферної ємності води.

Перехідна характеристика може бути апроксимована інтегруючими ланками з однаковими сталими часу в діапазонах зміни значень рН від 7,5 до 6,0 та від 3,5 до 3,0. В діапазоні значень рН від 6,0 до 3,5 – це аперіодична ланка порядку  $n \geq 2$ .

Зміна рН при підлужуванні кислого розчину нікелю  $NiSO_4$  (рН=3,45) 0,01 н розчином  $NaOH$  для осадження іонів нікелю наведена на рис. 3.

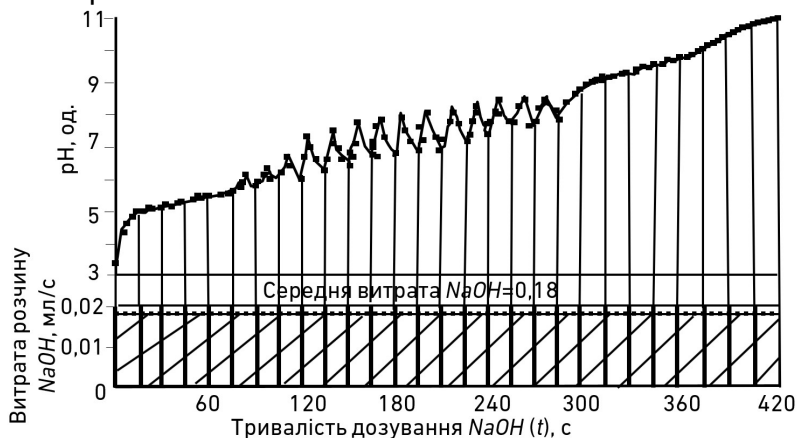
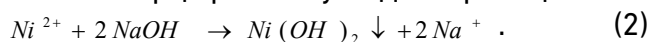


Рис. 3. Перехідна характеристика зміни рН розчину нікелю  $NiSO_4$  при імпульсному дозуванні 0,25 мл/л 0,01 н розчину  $NaOH$

Перехідна характеристика при  $pH < 5,2$  може бути апроксимована аперіодичною ланкою порядку  $n \geq 1$  та інтегруючою ланкою (за усередненими значеннями) при  $pH > 5,2$ . В середній частині перехідного процесу (при рН від 6,0 до 9,0) зміна рН має пилкоподібний характер, що обумовлено осадженням нікелю у вигляді гідроксиду після кожної порції реагенту згідно з реакцією



Тривалість стабілізації рН складає 18–20 сек. Після осадження нікелю пилкоподібність зникає.



Зміну рН при підлужуванні кислого розчину нікелю  $NiSO_4$  більш концентрованим 0,1 н розчином  $NaOH$  наведено на рис. 4. Перехідний процес також має значний пилкоподібний характер зміни рН. Тривалість стабілізації становить 6–7 с. Коливання рН поступово зникають і при значенні рН приблизно 9–9,5 вони відсутні, що свідчить про завершення процесу осадження гідроксиду нікелю. В результаті концентрація іонів нікелю знижувалась в середньому до 0,2–0,5 мг/л. За усередненими значеннями перехідна характеристика при  $pH < 6,5$  може бути апроксимована аперіодичною ланкою порядку  $n \geq 1$  та інтегруючою ланкою при  $pH > 6,5$ .

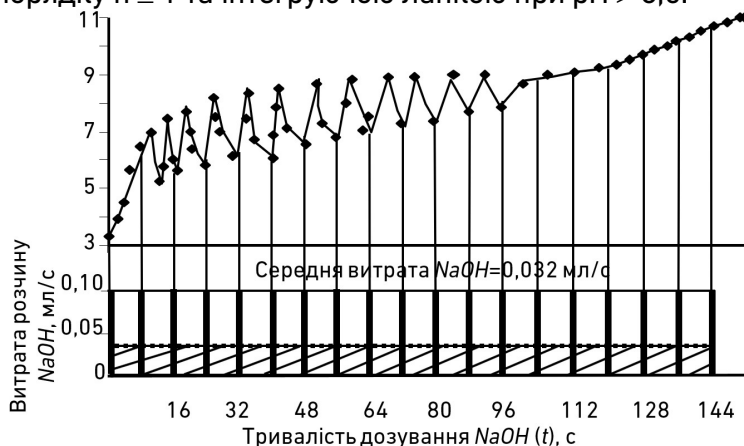


Рис. 4. Перехідна характеристика зміни рН розчину  $NiSO_4$  при імпульсному дозуванні 0,25 мл/л 0,1 н розчину  $NaOH$

Зміну рН при підкисленні лужного розчину нікелю  $NiSO_4$  ( $pH=11$ ) розчином  $HCl$  наведено на рис. 5.

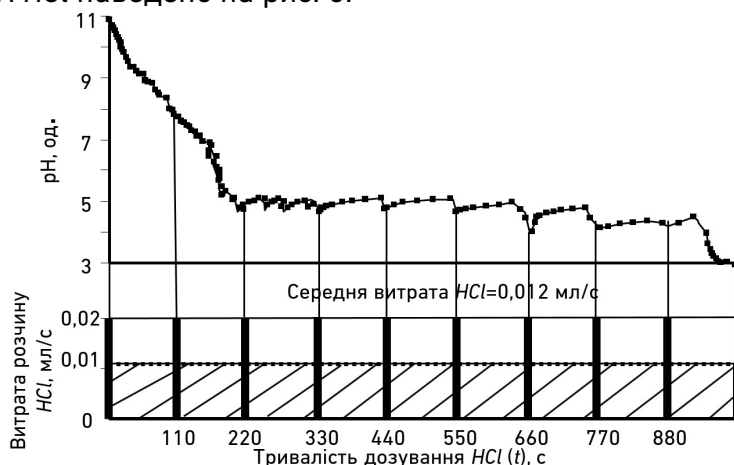
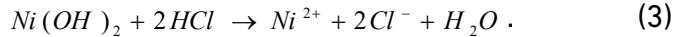


Рис. 5. Перехідна характеристика зміни рН розчину  $NiSO_4$  при імпульсному дозуванні 1 мл/л 0,01 н розчину  $HCl$

Зміна величини рН спочатку має лінійну форму, а після рН 6,5–7,9 з'являється значна нелінійність зміни у зв'язку з розчиненням раніше утвореного гідроксиду нікелю після додавання кожної порції кислоти згідно з реакцією



Тривалість стабілізації рН на початку підкислення незначна і складає біля 2–5 с, оскільки протікає процес нейтралізації луку. Однак надалі при розчиненні гідроксиду нікелю тривалість стабілізації рН значно зростає і досягає 100–110 с. Така значна тривалість стабілізації рН пояснюється тим, що розчинення сформованого гідроксиду нікелю у кислому середовищі протікає повільніше ніж його утворення при підлужуванні.

Враховуючи перехідні характеристики, отримані лабораторним шляхом, середня продуктивність насоса-дозатора для автоматизованого дозування реагентів розраховується залежно від величина порції (доза) реагенту при прийнятій його концентрації і обумовлюється тривалістю пилкоподібності на кривій титрування і розраховується за формулою

$$D_p = \frac{\Delta P_{pH}}{\Delta T_{доз} - \sum t_{стаб}}, \quad (4)$$

де  $\Delta P_{pH}$  – загальна витрата реагенту на пилкоподібній ділянці зміни рН;

$\Delta T_{доз}$  – загальна тривалість роботи насоса-дозатора в межах пилкоподібної ділянки зміни рН;

$\sum t_{стаб}$  – сума тривалості періодів стабілізації рН на пилкоподібній ділянці зміни рН.

Додаткове регулювання параметрів роботи насоса-дозатора проводиться шляхом регулювання його продуктивності (частоти поштовхів поршня). За межами пилкоподібності кривої титрування доза реагенту може бути прийнята відповідно до розрахованої дози, оскільки тривалість стабілізації рН при підлужуванні або підкисленні на цих ділянках значно менша ніж на ділянках пилкоподібності. У тому випадку, якщо потрібні параметри роботи, насамперед тривалість стабілізації рН після кожного імпульсу подачі реагенту, не можна встановити, то в систему автоматики додається регулятор частоти подачі реагенту, який забезпечує необхідну тривалість стабілізації рН на ділянці пилкоподібності кривої титрування у реакторі-змішувачі періодичної дії.

У зв'язку з вираженою нелінійністю статичних характеристик реактора-змішувача як об'єкта регулювання в системі автоматичного

дозування реагенту доцільно застосувати ПІД-регулятори із автоматичним підстроюванням параметрів регулятора залежно від крутизни статичної характеристики. Це дозволяє більш плавно та швидко регулювати рН, суттєво зменшити перерегулювання і за рахунок цього оптимізувати витрату реагенту залежно від вихідних показників стічної води. Сучасні програмовані засоби регулювання дозволяють реалізовувати такий алгоритм. Існує можливість зняття характеристики в процесі настроювання системи [6; 7; 10].

Комп'ютерне моделювання такої системи автоматизованого регулювання засобами Simulink показало, що система (рис. 6) забезпечує задані показники якості регулювання при різких змінах значень параметрів на вході. Як видно із графіків (рис. 7), система має досить високу ефективність щодо стабільності та якості регулювання подачі реагенту при різких змінах значень параметрів на вході та нелінійності перехідної характеристики.

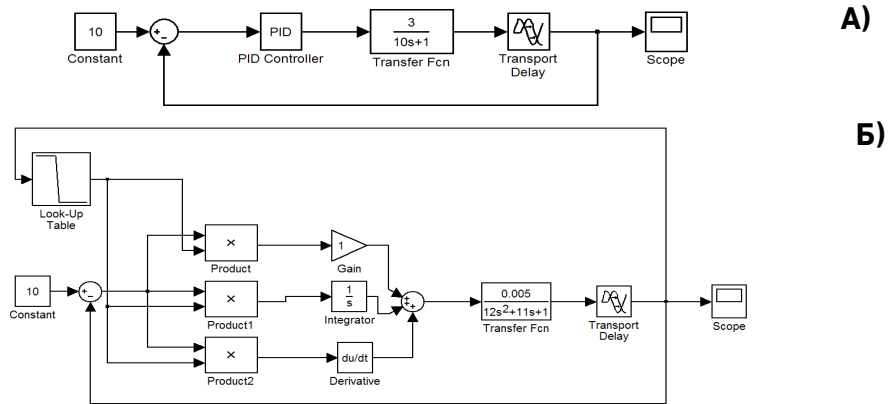


Рис. 6. Схеми системи автоматизованого регулювання: **A** – на базі ПІД-регулятора; **Б** – на базі ПІД-регулятора з динамічними коефіцієнтами

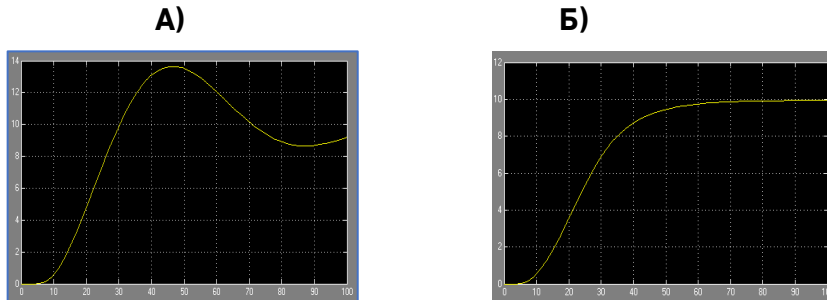


Рис. 7. Графіки перехідних процесів: **A** – на базі ПІД-регулятора; **Б** – на базі ПІД-регулятора з динамічними коефіцієнтами

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що при осадженні важких металів на кривих титрування розчинів із важкими металами з'являються пилкоподібні ділянки стабілізації рН, які відповідають області осадження металів у вигляді гідроксидів. В цьому випадку безперервне дозування реагентів навіть у змішувачі-реакторі періодичної дії може призвести до зниження якості осадження металів. Для покращення ефективності осадження металів доцільно застосовувати системи автоматизації на базі ПІД-регулятора, які передбачають імпульсне дозування реагентів та стабілізацію рН стічної води після введення кожної порції реагенту на ділянці пилкоподібності. Такі системи автоматизації дозволять економно витратити реагенти та досягти високої ефективності очищення металовмісних стічних від важких металів та інших домішок, пов'язаних з регулюванням рН водного середовища.

1. Филипчук В. Л. Очищення багатоконпонентних металовмісних стічних вод промислових підприємств. Рівне : УДУВГП, 2004. 232 с.
2. Kurniawan R., Agustiono T. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*. 2006. Vol. 118.1. Pp. 83–98.
3. Bhaskar D. Kulkarni, Sanjeev S. Tambe. Nonlinear pH control. *Chemical Engineering Division*. National Chemical Laboratory, India, October 2001.
4. Филипчук Л. В. Автоматизація процесу регулювання рН та Eh при очистці стічних вод від важких металів. *Комунальне господарство міст* : наук.-техн. зб. К. : Техніка, 2010. Вип. 93. С. 151–156.
5. Patterson J. W. *Industrial Wastewater Treatment Technology*. London : Butterworth Publishers, 1995. 420 p.
6. Филипчук В. Л., Древецький В. В., Филипчук Л. В. Автоматизоване керування природоохоронними системами очищення металовмісних стічних вод. Рівне : Овід, 2017. 288 с.
7. Hosono H., Satoh W., Toya M. Microanalysis system with automatic valve operation, pH regulation, and detection functions. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2008. Vol. 132, Is. 2. Pp. 614–628.
8. Филипчук Л. В. Автоматизація процесу регулювання рН та Eh при очищенні металовмісних стічних вод в оборотних системах водопостачання підприємств. К. : Вісник Інженерної академії України, 2013. Вип. 1. С. 204–208.
9. Fylypchuk V. Fylypchuk L. Electrochemical water softening in a diaphragm electrolyzer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv : PC «Technology center» Ukrainian State University of Railway Transport. 2017. Vol. 2/6 (86). Pp. 48–55.
10. Fosten A. Control of chemical dosing in wastewater treatment. *World Pumps*. Vol. 2007, Is. 490. Pp. 16–19.

## REFERENCES:

1. Fylypchuk V. L. Ochyshchennia bahatokomponentnykh metalovmishchiuchykh stichnykh vod promyslovykh pidpriemstv. Rivne : UDUVHP, 2004. 232 s.
2. Kurniawan R., Agustiono T. Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*. 2006. Vol. 118.1. Pp. 83–98.
3. Bhaskar D. Kulkarni, Sanjeev S. Tambe. Nonlinear pH control. *Chemical Engineering Division*. National Chemical Laboratory, India, October 2001.
4. Fylypchuk L. V. Avtomatyzatsiia protsesu rehuliuвання rN ta Eh pry ochysttsi stichnykh vod vid vazhkykh metaliv. *Komunalne hospodarstvo mist : nauk.-tekhn. zb. K. : Tekhnika*, 2010. Vyp. 93. S. 151–156.
5. Patterson J. W. Industrial Wastewater Treatment Technology. London : Butterworth Publishers, 1995. 420 p.
6. Fylypchuk V. L., Drevetskyi V. V., Fylypchuk L. V. Avtomatyzovane keruvannia pryrodookhoronnymy systemam ochyshchennia metalovmisnykh stichnykh vod. Rivne : Ovid, 2017. 288 s.
7. Hosono H., Satoh W., Toya M. Microanalysis system with automatic valve operation, pH regulation, and detection functions. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2008. Vol. 132, Is. 2. Pp. 614–628.
8. Fylypchuk L. V. Avtomatyzatsiia protsesu rehuliuвання rN ta Eh pry ochyshchenni metalovmisnykh stichnykh vod v oborotnykh systemakh vodopostachannia pidpriemstv. *Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy*. K., 2013. Vyp. 1. S. 204–208.
9. Fylypchuk V. Fylypchuk L. Electrochemical water softening in a diaphragm electrolyzer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv : PC «Technology center» Ukrainian State University of Railway Transport, 2017. Vol. 2/6 (86). Pp. 48–55.
10. Fosten A. Control of chemical dosing in wastewater treatment. *World Pumps*. Vol. 2007, Is. 490. Pp. 16–19.

---

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

### **ADJUSTMENT OF pH IN PREDICTION OF HEAVY METALS THROUGH PULSE DOSING OF REAGENTS IN AUTOMATED WATER PURIFICATION INSTALLATIONS**

**During the reagent precipitation of heavy metal ions, a characteristic feature of the process is the appearance of a saw-like change in the pH of the solutions, which is observed in the area of the titration curve of the aqueous medium when each portion of alkali is introduced. The graininess appears as a result of the formation of**

metal hydroxide, as a result of which the pH decreases. For the complete reaction of precipitation of hydroxide, a pH stabilization time is required, which depends on the alkali concentration and is on average 15–20 seconds. Currently, domestic water treatment plants use systems for automated introduction of reagents with a constant dose independent of the pH of the wastewater and a constant dose dependent on the pH to regulate the pH of industrial wastewater. However, due to the pollen-like nature, pH values that fluctuate in a narrow range of values are not always optimal for the precipitation of metals. This leads to a deterioration in the efficiency of precipitation of heavy metals and a decrease in the quality of wastewater treatment. To improve the efficiency of metal deposition, it is advisable to use automation systems based on a PID controller, which provide for pulse dosing of reagents and stabilization of the pH of wastewater after the introduction of each portion of the reagent in the area of the sawdust. Wastewater treatment for precipitation of heavy metals must be carried out in a batch mixer reactor. Computer modeling of this system of automated pH regulation using Simulink showed that the system provides the specified indicators of the quality of regulation with sudden changes in the values of the input parameters. In connection with the pronounced nonlinearity of the static characteristics of the reactor-mixer as a control object, it is advisable to use PID controllers with automatic adjustment of the controller parameters depending on the steepness of the static characteristic. This allows you to more smoothly and quickly adjust the pH, significantly reduce overregulation and optimize the consumption of the reagent depending on the initial parameters of the wastewater. Such automation systems will allow economical consumption of reagents and achieve high efficiency of cleaning metal-containing wastewater from heavy metals and other impurities related to pH regulation of the water environment.

*Keywords:* heavy metals; sedimentation; saw-likeness of pH change; automated systems; PID regulation.

---