

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

---

УДК 519.816:681.5.015:004.891.3

ЖУЧЕНКО А. І.<sup>1</sup>, д.т.н., проф.; ОСІПА Р. А.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.;  
ОСІПА Л. В.<sup>2</sup>, к.п.н., доц.; ЛАДІЄВА Л. Р.<sup>1</sup>, к.т.н., доц.  
1 – Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
2 – Національний транспортний університет України

### АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ БУФЕРНИХ СТІЧНИХ ВОД

*Розглянуто особливості процесу нейтралізації стічних вод з буферними властивостями. Виділення етапів при визначенні керуючого впливу дозволило на основі математичної моделі розробити алгоритм керування процесом нейтралізації буферних стічних вод, що дало можливість перейти до розробки відповідного програмного забезпечення системи керування.*

**Ключові слова:** буферні стічні води, нейтралізація, алгоритм керування.

**DOI:** 10.20535/2617-9741.3.2021.241028

© Жученко А. І., Осіпа Р. А., Осіпа Л. В., Ладієва Л. Р., 2021.

**Постановка проблеми** На сучасному етапі питання розвитку виробничих сил у різних регіонах нашої країни мають вирішуватися з урахуванням екологічних наслідків. Потреби промислових підприємств у водних ресурсах збільшуються, що ставить завдання повторного використання води. Щодо процесу нейтралізації промислових стічних вод, то він відноситься до одних із самих розповсюджених процесів очищення, що й визначає увагу дослідників.

Для розбавлених розчинів сильних кислот та лугів значення  $pH$  пов'язане з їх концентрацією, а отже, і з необхідною для нейтралізації дозою реагенту, однозначною залежністю. У цьому випадку величина  $pH$  є цілком достовірним параметром керування процесом нейтралізації. Однак при наявності в стічних водах компонентів, що володіють буферними властивостями, наприклад, суміші слабких кислот та лугів, а також їх солей в суміші з сильними кислотами, процес нейтралізації описується вже сімейством характеристик. В останньому випадку традиційні автоматичні системи з якісним регулюванням  $pH$  не справляються. У зв'язку із цим, визначення керуючого впливу має вестися на основі аналізу історії значень  $pH$  та доз реагенту, які беруться з бази даних реального часу. А для функціонування системи керування процесом має бути програмне забезпечення для створення якого і було розроблено представлений алгоритм.

**Аналіз попередніх досліджень.** Аналіз систем, що були запропоновані для керування даним процесом дозволяє стверджувати що жодна з них не справляється зі збуреннями для стічних вод, що мають значний діапазон ступеня буферності. Недоліками системи керування, що описується в патенті США №3899294 [1], є невисока якість регулювання через відсутність контролю значення  $pH$  на виході реактора.

Недоліками системи керування, що запропонована у роботі [2] є відсутність контура регулювання по збуренню. В умовах різкої нестационарності вхідних параметрів, це приводить до значних проскоків забруднювачів. Крім цього, адаптивний алгоритм переналаштування параметрів регулятора на основі стохастичного методу досить складний при реалізації.

Недоліками системи керування, що запропонована в патенті США №3791793 [3] є невисока якість регулювання при різких змінах буферності стічних вод. Це пояснюється тим, що ця система керування є адаптивною тільки для контура регулювання по збуренню, а контур регулювання по відхиленню працює з постійними налаштувальними параметрами. В умовах значного діапазона зміни буферних властивостей стічних вод це приводить до небажаного збільшення часу регулювання та довгострокового відхилення  $pH$  від заданого значення.

Тому важливим завданням постає розробка алгоритма керування процесом нейтралізації буферних стічних вод, що має бути реалізований при супервізорному керуванні в рамках функціонування АСК ТП

очищення. При такому керуванні стає можливим робити переналаштування параметрів регуляторів при зміні буферності стічних вод, що дасть покращення якості регулювання (і як наслідок очищення стічних вод) за рахунок скорочення часу регулювання і зменшення відхилення  $pH$  від заданого значення. Це завдання може бути вирішене в тому випадку коли система керування буде адаптивною не тільки для контура регулювання по збуренню, а також і по контуру регулювання по відхиленню, тобто параметри налаштування регулятора по відхиленню мають змінюватися при зміні коефіцієнта передачі об'єкта таким чином, щоб забезпечити достатню швидкість налаштування регулятора по збуренню і тим самим зменшити динамічне відхилення та час перехідного процесу. На основі такого підходу в представленому алгоритмі запропоновано блок корекції коефіцієнта пропорційності ПІ-регулятора (регулятора по відхиленню, за допомогою якого виконується адаптація параметрів налаштування цього регулятора при зміні ступеня буферності стічних вод).

**Метою** статті є представлення алгоритма керування процесом нейтралізації буферних стічних вод на технологічному рівні управління сучасного підприємства маловідходної технології.

**Виклад основного матеріалу.** До теперішнього часу корекція необхідних доз реагентів для очищення стічних вод, що мають у своєму складі дві та більше кислот і розрахунок оптимальних завдань системі керування процесом здійснювались приблизно, що й було однією з головних причин проскоків забруднюючих речовин у навколишнє середовище. Тобто, процес нейтралізації стічних вод на сьогодні потребує покращень та має значний потенціал для аналізу, автоматизації і пошуку залежностей для подальшої оптимізації. Даний алгоритм керування базується на вихідних даних показників датчиків  $pH$ , витрати стічних вод  $Q$  та витраті реагенту, які надходять у базу даних реального часу (БДРЧ), що дозволяє використовувати історію значень змінних, щоб завчасно реагувати на збурення та покращувати якість керування в цілому. Базу даних реального часу обслуговує система керування базами даних PostgreSQL, яка була вибрана методом експертних оцінок [4].

Оцінка буферності стічних вод в алгоритмі робиться за наступною залежністю для коефіцієнта буферності [5]:

$$b = \frac{\Delta pH}{\Delta \Phi},$$

де:  $\Delta \Phi = \frac{\Delta qc}{V}$ ,  $\Delta q$  — доза реагенту,  $c$  — концентрація реагенту,  $V$  — об'єм стоку.

З результатів експериментів можна зробити висновок, що при нейтралізації буферних стічних вод протікає гетерогенна реакція, котра може бути апроксимована реакцією першого порядку з константою реакції  $k = 0,125$  та  $T_p = 8$  сек [6].

Розглядаючи реактор нейтралізації як апарат ідеального перемішування, в котрий поступає потік стічної води, з концентрацією іонів  $[H^+] = C_1^+$ , іонів  $[OH^-] = C_1^-$  і потік реагенту з концентрацією іонів  $[H^+] = C_2^+$ , іонів  $[OH^-] = C_2^-$  (рисунк 1) отримаємо рівняння динаміки по компонентах:

$$\text{по компоненту } [H^+]: V \frac{dC^+}{dt} = Q_1 C_1^+ + Q_2 C_2^+ - (Q_1 + Q_2) C^+ + R, \quad (1)$$

$$\text{по компоненту } [OH^-]: V \frac{dC^-}{dt} = Q_1 C_1^- + Q_2 C_2^- - (Q_1 + Q_2) C^- + R, \quad (2)$$

де  $R$  — величина, що враховує кінетику реакції.

Враховуючи, що  $C_1^+ C_1^- = K_w$ , де  $K_w = 10^{-14}$  (моль/л<sup>2</sup>), відніmemo від рівняння (1) рівняння (2) і введемо нову змінну  $c_i$ :

$$c_i = c_i^+ - c_i^- = c_i^+ - \frac{k}{c_i^+}$$

Позначивши  $q_i = Q_i/V$ , отримаємо результуюче рівняння:

$$\dot{c} = q_1 c_1 + q_2 c_2 - (q_1 + q_2) c$$

Після доповнення представленої моделі динаміки реактора нейтралізації статичними залежностями [7], отримаємо повну математичну модель процесу нейтралізації буферних стічних вод у реакторі без запізнювання.

Зрозуміло, що реактор є основним динамічним елементом системи, що розглядається, але є й інші елементи, динаміку яких необхідно врахувати при синтезі системи керування цим апаратом.

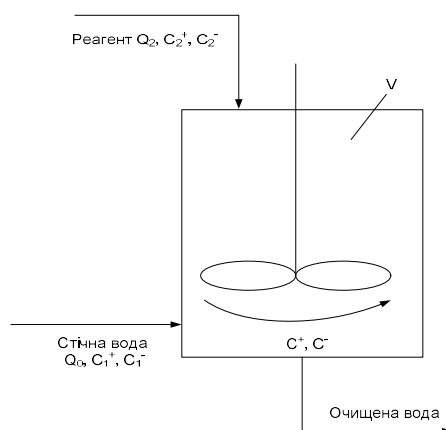


Рис. 1 - Реактор-нейтралізатор

Запізнення у реакторі можна врахувати як ланку чистого запізнення:

$$W_{датч}(p) = \frac{1}{T_{датч}p + 1}$$

Дозуючий тракт системи зазвичай апроксимується ланкою з передатною функцією:

$$W_{доз}(p) = \frac{K_{доз}e^{-p\tau_{доз}}}{T_{доз}p + 1},$$

де  $K_{доз}$  – коефіцієнт підсилення дозуючого тракту,  $e^{-p\tau_{доз}}$  – ланка, еквівалентна всім запізнюванням,  $T_{доз}p + 1$  – ланка, еквівалентна всім інерційностям.

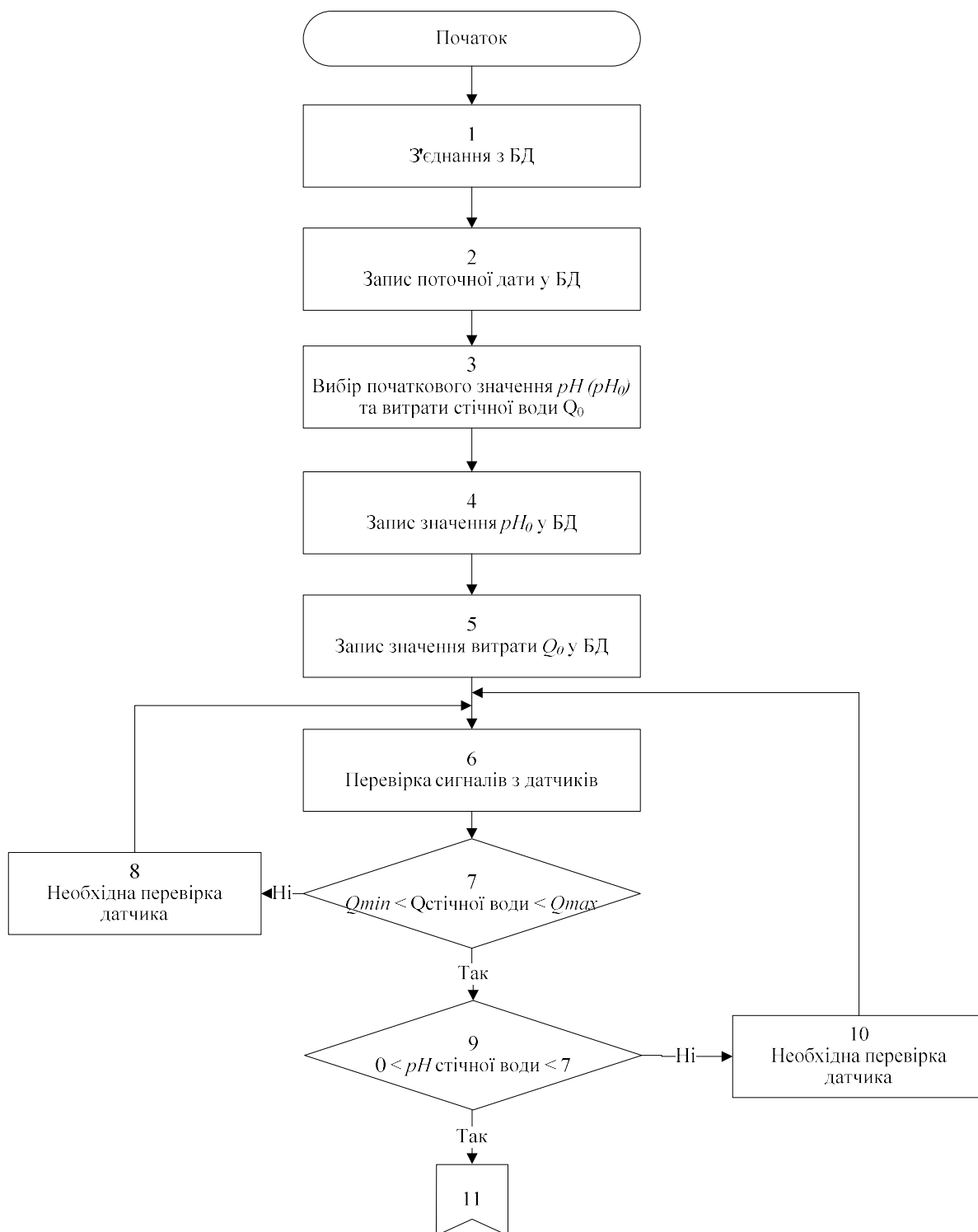
Наведені залежності дозволяють переналаштовувати систему за потребою при нових значеннях буферності стічних вод, якщо поточні налаштування не забезпечують необхідної точності та не гарантують стабільного результату очищення на виході з реактора.

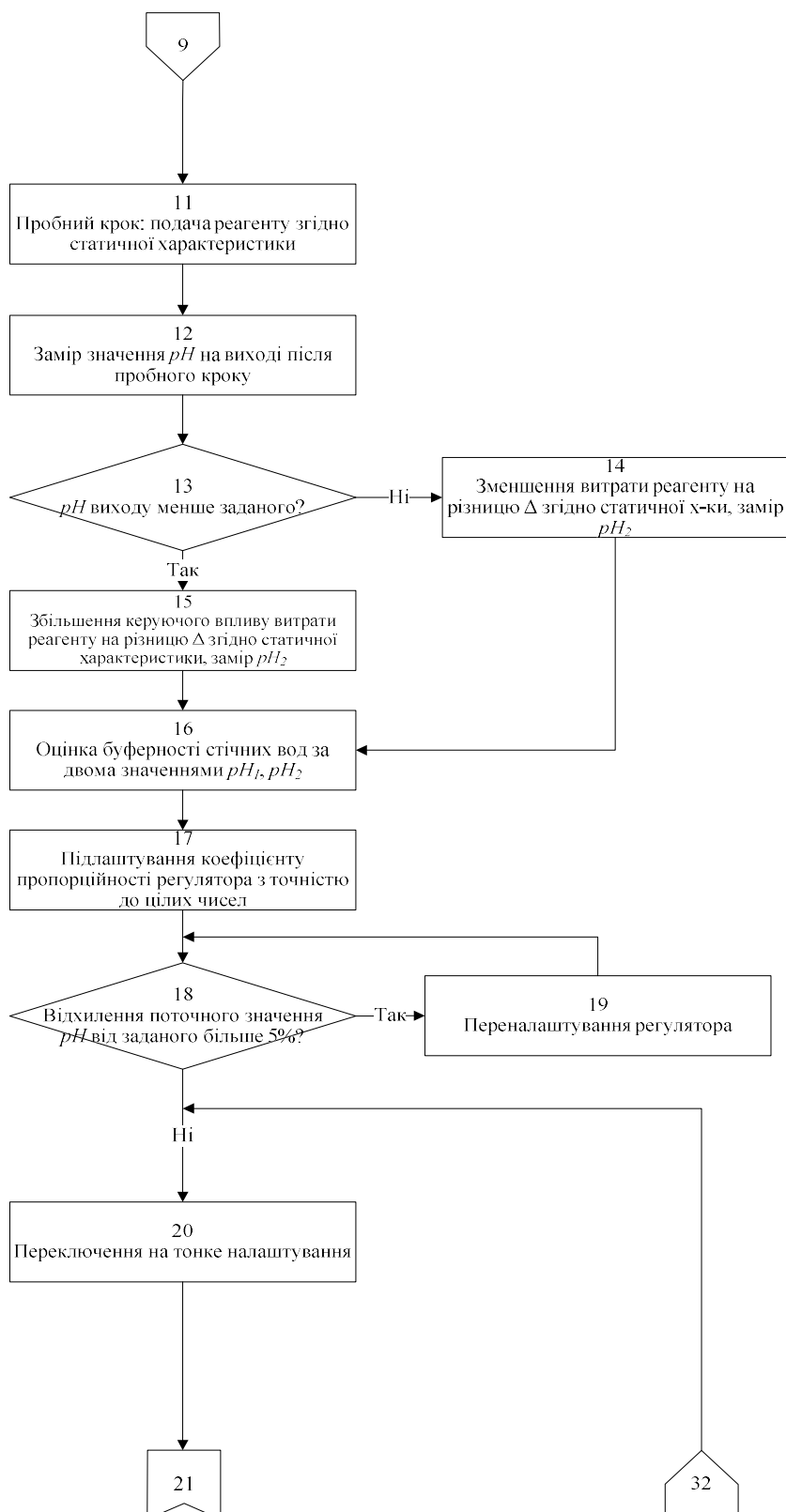
На початку роботи програми встановлюється з'єднання з БДРЧ і проводиться опитування всіх датчиків. При виявленні несправності останніх, надходить інформація про місце несправності, час несправності та видається попередження на пульт керування, що знижує проскоки забруднюючих речовин і допомагає діагностувати обладнання, яке встановлено в системі керування. Наступним кроком проводиться зчитування показників датчиків на вході реактора та подається кількість реагенту, що визначається за статичною характеристикою. Використовуючи значення  $pH$  на виході реактора розраховується показник буферності  $b$  та розраховуються грубі налаштування регулятора (з точністю до цілих чисел) для пришивдшеного виходу на усталений режим. Таким чином система максимально швидко подає нейтралізуючий реагент, щоб знизити викиди неочищеної води у навколишнє середовище. На початковому етапі проводиться замір значення концентрації забруднюючої речовини на виході, і поки вона відрізняється більше, ніж на 5% по модулю – регулятор подає максимально можливу кількість реагенту. Саме за відхиленням  $\pm 5\%$  обирається час переходу на наступний етап.

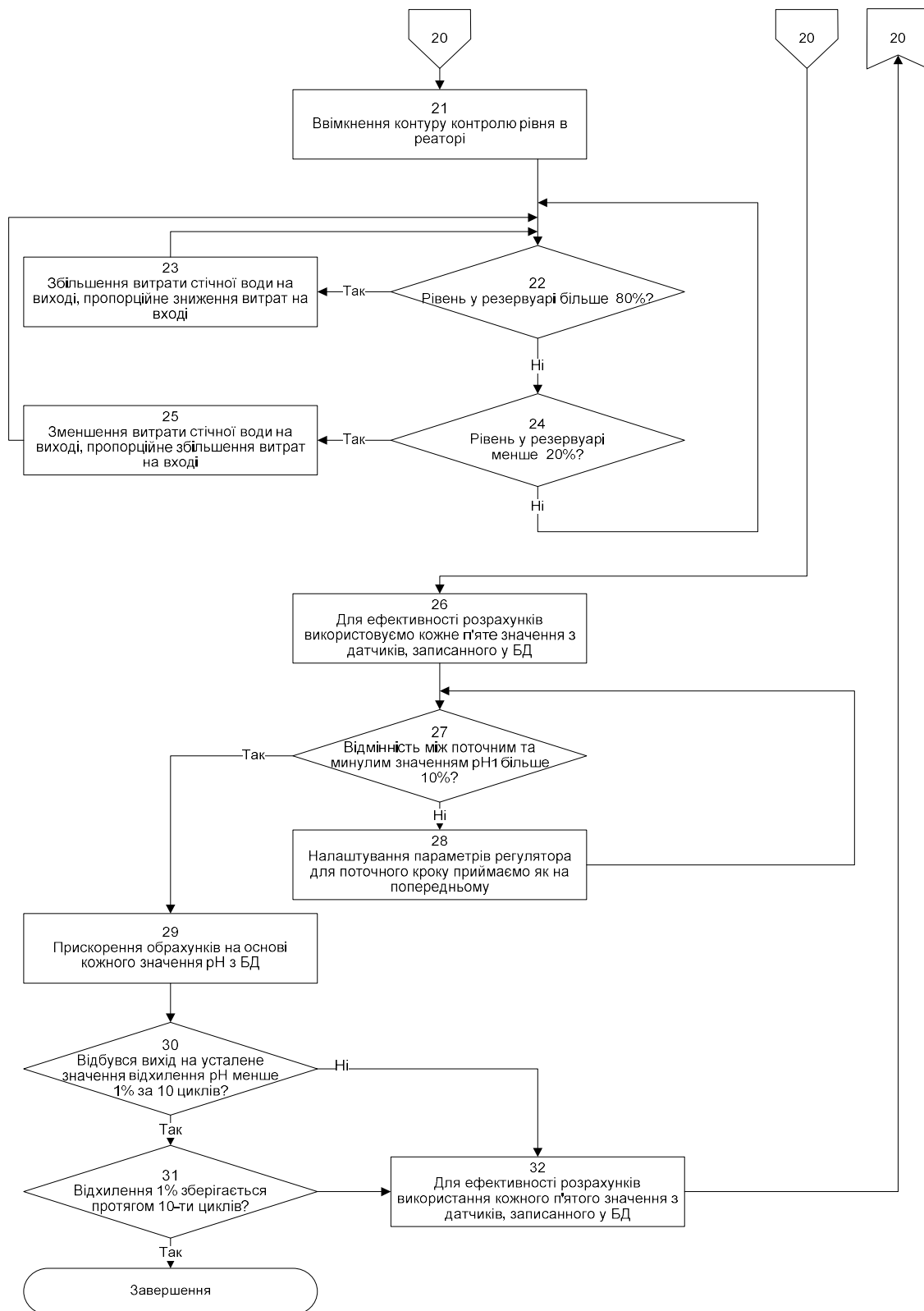
Цей крок представляє собою плавне регулювання, мета якого підійти якнайближче до заданого значення  $pH$  на виході. Через особливість буферних стічних вод, а саме - нелінійну залежність концентрації на виході від дози реагенту внаслідок наявності одночасно сильних та слабких кислот у складі стічної води, алгоритм плавно підходить до потрібного значення, оцінюючи наскільки коефіцієнт буферності залежить від різниці між поточним та попереднім вимірами. Такий підхід дозволяє суттєво економити час виходу на усталене значення не втрачаючи при цьому точність.

Після виходу на усталене значення  $pH$  система переходить у режим постійного моніторингу та підтримки сталого значення на виході. Це досягається постійним моніторингом значення  $pH$  підсистемою, але вибірковою використання значень із бази даних. Таким чином система у цьому режимі характеризується низьким енергоспоживанням та економністю пам'яті, що займається на сервері. При цьому підсистема при відхиленні  $\pm 1\%$  від заданого значення  $pH$  виводить систему з режиму енергозбереження та повертається на етап плавного регулювання, чим забезпечує безперервний, точний та енергоефективний процес регулювання.

Блок-схему алгоритма керування даним процесом зображено на рисунку 2. Програма, що реалізує розроблений алгоритм написана на мові програмування Python, середовище якої добре інтегроване з системою керування базами даних PostgreSQL.







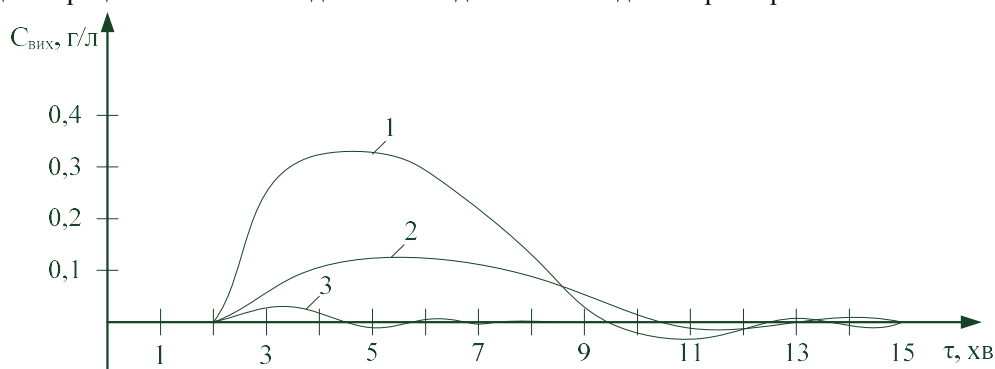
**Рис. 2 – Алгоритм керування процесом нейтралізації буферних стічних вод**

Для того, щоб оцінити функціонування алгоритма керування було проведено порівняння роботи альтернативних варіантів систем керування. Коливання режимних параметрів лежать в нижченаведених межах і розрахунки перехідних процесів проводилися для початкових даних, що наведені в таблиці 1.

**Таблиця 1 – Режимні параметри процесу нейтралізації буферних стічних вод**

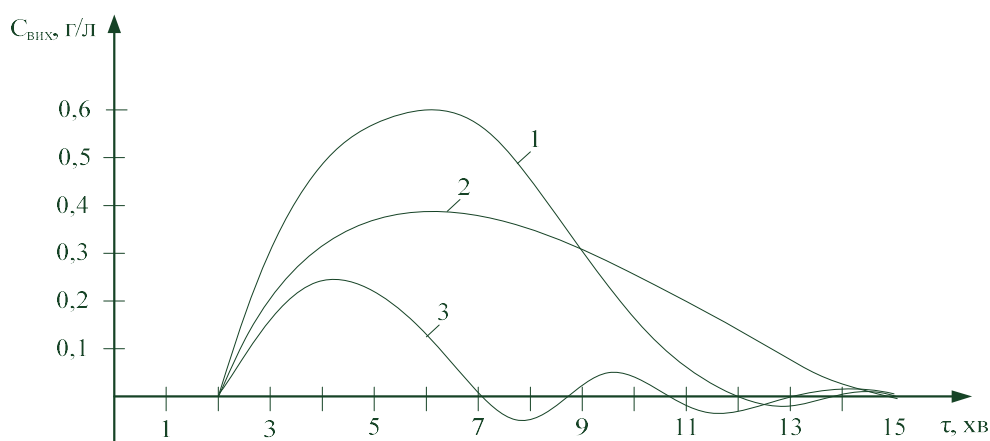
Витрата стічних вод	від 50 до 100 м <sup>3</sup> /год
Концентрація реагенту $Ca(OH)_2 - C_p$	від 50 до 100 г/дм <sup>3</sup>
Концентрація сірчаної кислоти в початковій воді $C_l$	від 0 до 3 г/дм <sup>3</sup>
Коефіцієнт буферності $b$	від 0,02 до 0,47 г/дм <sup>3</sup> рН

Як показують результати моделювання (рисунки 3-6) система керування за варіантом 3 має найменший час перехідних процесів та найменше динамічне відхилення вихідних параметрів.



*1 – перехідні процеси для системи керування, що відповідає патенту США US3791793A; 2 - перехідні процеси для системи керування, що відповідає патенту США US3899294A; 3 – перехідні процеси для системи керування, що функціонує за розробленим алгоритмом.*

**Рис. 3 – Перехідні процеси альтернативних систем керування процесом нейтралізації буферних стічних вод при середніх значеннях режимних параметрів та ступеня буферності  $b=0,02$  г/л рН**



**Рис. 4 – Перехідні процеси альтернативних систем керування процесом нейтралізації буферних стічних вод при середніх значеннях режимних параметрів та ступеня буферності  $b=0,47$  г/л рН**

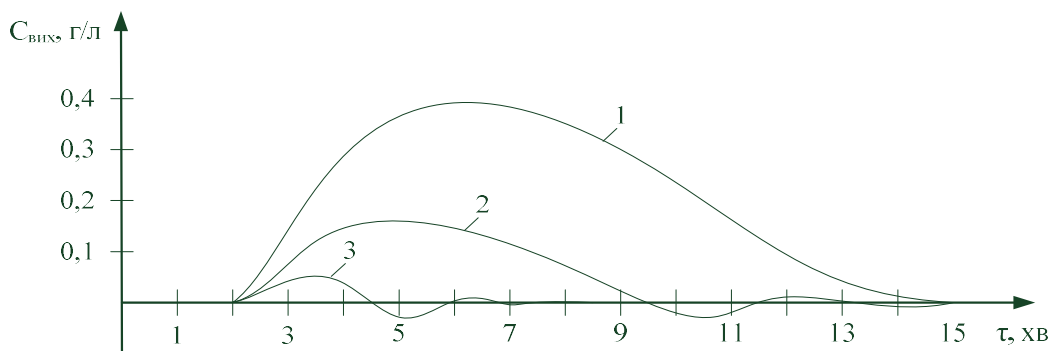


Рис. 5 – Перехідні процеси альтернативних систем керування процесом нейтралізації буферних стічних вод при екстремальних значеннях режимних параметрів та ступеня буферності  $b=0,02$  г/л рН

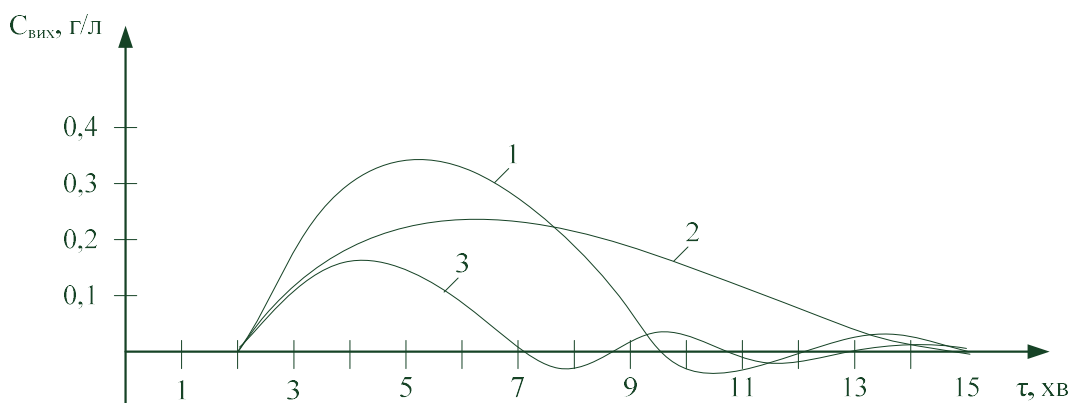


Рис. 6 – Перехідні процеси альтернативних систем керування процесом нейтралізації буферних стічних вод при екстремальних значеннях режимних параметрів та ступеня буферності  $b=0,47$  г/л рН

**Висновки.** Запропонований алгоритм керування процесом нейтралізації буферних стічних вод дозволив перейти до розробки програмного забезпечення системи керування даним процесом. Впровадження автоматизованих систем керування у роботу очисних споруд сучасного підприємства дозволить підвищити якість очищення, що робить ефективний вплив на функціонування основного виробництва і значно скорочує витрати на додаткове водоспоживання, а також дає можливість зменшити викид забруднень у навколишнє середовище.

**Перспективи подальших досліджень.** Система керування, алгоритмічне забезпечення якої представлено у даній роботі, може використовуватися як складова у розподіленій системі керування (РСК) процесами водозбереження сучасного підприємства. Це пов'язано з тим, що майже завжди очищення стічних вод – це комплекс методів. Дуже широко використовується сполучення механічного очищення, нейтралізації стоків, реагентного та біоочищення. Спочатку потрібно буде запропонувати мережеву структуру РСК. З цією метою необхідно провести аналіз системи зв'язків мікрокомп'ютерів з типовими процесами очищення стічних вод. В подальшому мають бути розроблені алгоритмічне та програмне забезпечення системи керування іншими типовими процесами очищення, що не були розглянуті у проведеному дослідженні.

#### Список використаної літератури

1. United States Patent US3791793A P. Friedmann, W. Gohen Adaptive feed forward-feedback control of the concentration of a selected ion of a solution. June, 1974.
2. Grahim N. Alwan, Farooq A. Mehdi, Murtadha Saban Murtadha pH control of a wastewater treatment unit using LabVIEW and genetic algorithm. JChEC06 The Sixth Jordan International Chemical Engineering Conference, 12-14 March 2012, Amman, Jordan. pp.329-337.
3. United States Patent P. Magirus US3899294A Method for automatic feed forward control of effluent pH. Aug. 2020



- Anatolii I. Zhuchenko, Liudmyla V. Osipa, Evgeniy S. Cheropkin, Design Database for an Automated Control System of Typical Wastewater Treatment Processes. International Journal of Engineering and Manufacturing(IJEM), Vol.7, No.4, pp.36-50, 2017. DOI: 10.5815/ijem.2017.04.04.
- Гордин И.В., Манусова Н.Б., Смирнов Д.Н. Оптимизация химико-технологических систем очистки промышленных сточных вод. Ленинград: Химия, 1977. 177 с.
- Ruslan A. Osipa, Statics Simulation of the Buffer Wastewater Neutralization Process. International Journal of Engineering and Manufacturing, Vol. 4, No. 9, pp. 1-14, July 2019, DOI: 10.5815/ijem.2019.04.01.
- Жученко А. І. Застосування мікропроцесорної техніки в системах керування очищенням стічних вод / А. І. Жученко, М. З. Кваско, Р. А. Осіпа // Вісн. нац. техн. ун-ту України «Київ. політех. ін.-т»; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження», 2011. № 2 (8). С. 143–145.

Надійшла до редакції 17.05.2021

---

**Zhuchenko A. I., Osipa R. A., Osipa L. V., Ladieva L. R.**

### **ALGORITHM FOR CONTROLLING THE PROCESS OF BUFFER WASTEWATER NEUTRALIZATION**

*In Ukraine, the condition of surface water near industrial enterprises is extremely critical. The operation of enterprises leads to intensive water pollution with industrial and domestic wastewater. Therefore, improving the quality of treatment facilities through the introduction of automated control systems is an urgent problem.*

*For the operation of automated control systems for typical cleaning processes, a software package is required, which is developed on the basis of appropriate algorithmic software and mathematical models of processes. To obtain them, methods of mathematical and simulation modeling and block diagram method of algorithmization were used.*

*In order to assess the quality of the developed algorithm for controlling the process of buffer wastewater neutralization during operation, a comparison of control system operation based on this algorithm with the most successful foreign variants of neutralization control systems was made. Simulation for the average values of operating parameters  $Q = 75 \text{ m}^3 / \text{h}$ ,  $C_p = 75 \text{ g} / \text{l}$ , and  $C_k = 2 \text{ g} / \text{l}$  at minimum  $b = 0.02 \text{ g} / \text{l pH}$  and maximum buffer value  $b = 0.47 \text{ g} / \text{l pH}$ , and also with unidirectional extreme combination of parameters  $Q = 50 \text{ m}^3 / \text{h}$ ,  $C_p = 100 \text{ g} / \text{l}$ ,  $b = 0,02 \text{ g} / \text{l pH}$  and  $Q = 100 \text{ m}^3 / \text{h}$ ,  $C_p = 50 \text{ g} / \text{l}$ , for minimum  $b = 0.02 \text{ g} / \text{l pH}$  and maximum buffering value  $b = 0.47 \text{ g} / \text{l pH}$  shows that the best quality of transient processes is for the control system operating on the basis of the developed algorithm. For any combination of parameters, the transients for this control system provide better quality transients. Studies have shown that the control system based on the developed algorithm in comparison with the previously proposed systems provides better process control by reducing the time of transients and reducing the dynamic deviation of the output parameters, which improves the quality of wastewater treatment.*

*Given the non-stationary process and high requirements for the cleaning parameters, manual control of this process is beyond the power of even an experienced operator. The developed mathematical model describing the dynamics of the wastewater neutralization reactor with buffer properties and the process control algorithm made it possible to proceed to the development of the control system software, which is necessary for the automated control of this process.*

**Keywords:** *buffer wastewater, neutralization, control algorithm*

#### **References**

- United States Patent US3791793A P. Friedmann, W. Gohen Adaptive feed forward-feedback control of the concentration of a selected ion of a solution. June, 1974.
- Grahim N. Alwan, Farooq A. Mehdi, Murtadha Saban Murtadha (2012). pH control of a wastewater treatment unit using LabVIEW and genetic algorithm. JChEC06 The Sixth Jordan International Chemical Engineering Conference, 12-14 March, Amman, Jordan. pp. 329-337.
- United States Patent P. Magirus US3899294A Method for automatic feed forward control of effluent pH. Aug. 2020.
- Anatolii I. Zhuchenko, Liudmyla V. Osipa, Evgeniy S. Cheropkin. (2017). Design Database for an Automated Control System of Typical Wastewater Treatment Processes. International Journal of Engineering and Manufacturing (IJEM), Vol.7, No.4, pp. 36-50, DOI: 10.5815/ijem.2017.04.04.
- Gordin I.V., Manusova N.B., Smirnov D.N. (1977). Optimizacija ximiko-texnologicheskix system ochistki promuschlenux stochnux vod. Leningrad: Ximija, 177 p.
- Ruslan A. Osipa, (2019). Statics Simulation of the Buffer Wastewater Neutralization Process. International Journal of Engineering and Manufacturing, Vol. 4, No. 9, pp. 1-14, July, DOI: 10.5815/ijem.2019.04.01.
- Zhuchenko, A. I., Kvasco, M. Z. and Osipa, R. A. (2011) "The use of microprocessor technology in control systems wastewater treatment", *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrayiny "Kyivivs'kyu politekhnichnyy instytut"*, ser. «*Xhimichna inzheneriya, ekolohiya ta resursozberezhennya*». Vol. 8, no 2, pp. 143–145.