

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

## **МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ РЕГУЛЮВАННЯ рН ТА Еh В ГІДРАВЛІЧНИХ РЕАКТОРАХ-ЗМІШУВАЧАХ ЯК ОБ'ЄКТАХ КЕРУВАННЯ**

**Розглянуто процес моделювання роботи гідравлічного змішувача-реактора перегородчастого типу як об'єкта керування при регулюванні параметрів рН та Еh в процесах очищення стічних вод. Визначено особливості роботи, фізичне підґрунтя даного об'єкта керування та його імітаційне моделювання в системах автоматизації очищення стоків. Результати моделювання показують, що складена математична модель відповідає експериментальним залежностям. Результати проведеного дослідження можливо використовувати для оптимізації геометричних розмірів даного змішувача-реактора та нових алгоритмів керування для найбільш ефективного регулювання параметрів стічної води.**

**Ключові слова:** очищення стічних вод; автоматизація; параметри рН та Еh; імітаційне моделювання.

**Вступ.** Регулювання величин активної реакції (рН) та окисно-відновного потенціалу (Еh) водного середовища відіграє важливу роль при очистці стічних вод від різних забруднюючих домішок, в тому числі важких металів. Величини рН та Еh можна змінювати як внаслідок додавання хімічних реагентів, так і в результаті змішування різних категорій стоків. Зокрема, при змішуванні сильних кислот та основ зміна рН середовища має логарифмічну залежність від концентрації іонів водню, але в реальних умовах зміна цих параметрів має більш складний характер [1–3].

Важливим фактором протікання хімічних реакцій у всьому об'ємі води, що обробляється, є повне та швидке змішування реагентів із стічними водами для досягнення заданих значень рН та Еh. Для регулювання рН та Еh на практиці використовують

змішувачі-реактори, де спочатку відбувається змішування доданого реагенту із стічною водою, а потім відбувається відповідні хімічні реакції. Якщо воду обробляють декількома реагентами, то змішувачі-реактори повинні забезпечувати можливість послідовного введення реагентів через визначені проміжки часу. Змішувачі, що використовуються на вітчизняних та зарубіжних водоочисних станціях, можна розділити на чотири групи: гідравлічні, механічні, пневматичні та комбіновані. В промисловості широко поширені гідравлічні змішувачі-реактори, які для забезпечення ефективного процесу перемішування додатково обладнуються відповідним чином розміщеними перегородками [4; 5].

Прикладом такого апарату є гідравлічний змішувач-реактор [6; 7], що використовується в установці очищення стічних вод гальванічного виробництва на ТзОВ «Мелітопольський завод підшипників ковзання», схема якого наведена на рис. 1.

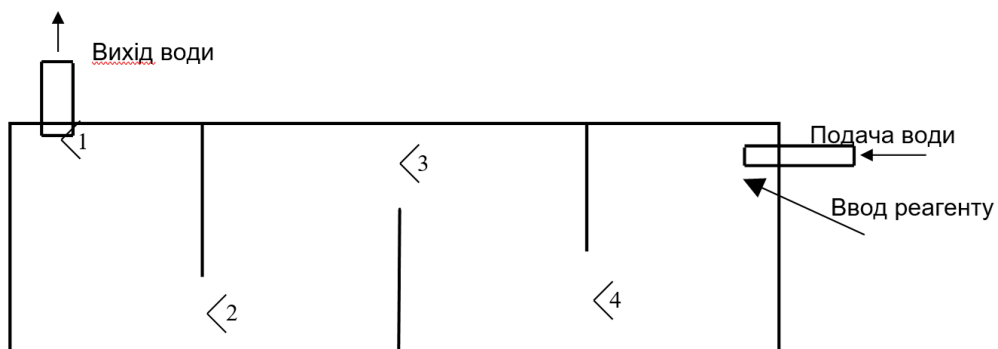


Рис. 1. Схема гідравлічного реактора-змішувача перегородчастого типу в очисній системі на ТзОВ «Мелітопольський завод підшипників ковзання»: 1, 2, 3, 4 – місця відбору проб

При турбулентному режимі течії, що має місце у гідравлічних змішувачах-реакторах, в'язкість рідини залежить не лише від її фізико-хімічних параметрів, але й локальних характеристик потоку [2]. Згідно з гіпотезою Буссінеска величина турбулентної в'язкості залежить від кінетичної енергії турбулентності  $k$  та швидкості дисипації енергії  $\varepsilon$  :

$$\eta_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1)$$

Найбільш поширеними є двопараметричні моделі турбулентності в яких разом з рівнянням Нав'є – Стокса використовуються співвідношення для швидкостей поширення кінетичної енергії та дисипації енергії турбулентності. Система рівнянь для опису руху рідини в гідродинамічному дроселі при турбулентному режимі складається із чотирьох рівнянь:

1. Ізотермічного руху нестискуваної рідини при турбулентному режимі:

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = \left( \eta + C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \right) \nabla^2 U - \rho (U \cdot \nabla) U - \nabla P. \quad (2)$$

2. Неперервності потоку:

$$\nabla U = 0. \quad (3)$$

3. Швидкості поширення турбулентної кінетичної енергії:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} = \nabla \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_k \varepsilon} \right) \nabla k \right] + \rho \left[ C_\mu \frac{k^2}{2\varepsilon} (\nabla U)^2 - \varepsilon - U \nabla k \right]. \quad (4)$$

4. Швидкості дисипації турбулентної енергії:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \nabla \left[ \left( \eta + \rho \frac{C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon \varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \rho \left[ C_{\varepsilon_1} \frac{k}{2} (\nabla U)^2 - C_{\varepsilon_2} \frac{\varepsilon^2}{k} - U \nabla \varepsilon \right], \quad (5)$$

де  $C_\mu = 0,09$ ,  $C_{\varepsilon_1} = 1,44$ ,  $C_{\varepsilon_2} = 1,92$ ,  $\sigma_k = 0,9$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  – константи моделі;  $\rho$  – густина рідини;  $\eta$  – динамічна в'язкість рідини;  $k$  – енергія турбулентного руху,  $\varepsilon$  – швидкість розсіювання енергії турбулентного руху.

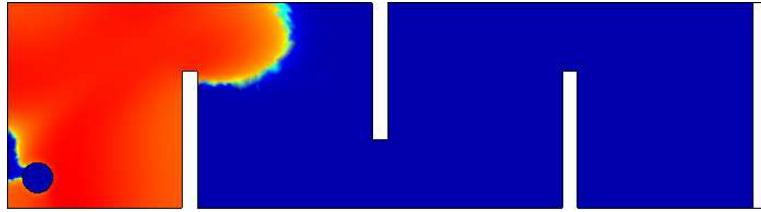
Сукупність рівнянь (2–5) описує потік рідини в турбулентних потоках, на які не впливають в'язкі граничні ефекти біля поверхонь,

тобто вони можуть бути використаними для областей течії, які лежать поза межами в'язкого підшару і перехідної області. Ці обставини спонукають до використання так званих межових функцій, які дозволяють змістити граничні умови з поверхні у точки, розміщені поза областю впливу в'язкості.

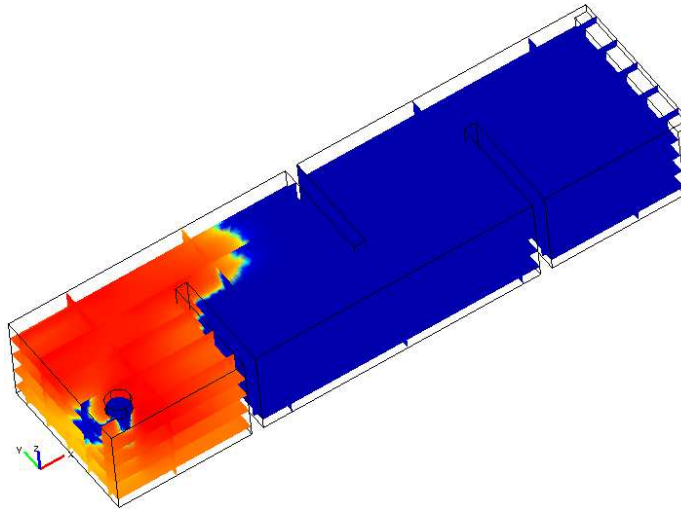
Складність фізико-хімічних процесів, що відбуваються в реакторах-змішувачах як об'єктів систем автоматичного регулювання рН і Eh вимагає їх детального аналізу та комп'ютерного моделювання із використанням сучасних пакетів прикладних програм. Однією із таких програм для комп'ютерного моделювання фізико-хімічних процесів та явищ, вважається програма FEMLAB з модулем Chemical Engineering компанії COMSOL, яка призначена для вирішення широкого кола задач, сформульованих системами рівнянь в частинних похідних методом скінчених елементів. Особливістю програми є можливість розв'язку тривимірних задач.

Для даного змішувача-реактора було проведено тривимірне моделювання процесу зміни рН при додаванні деякої порції реагенту. Результати показані на рис. 2.

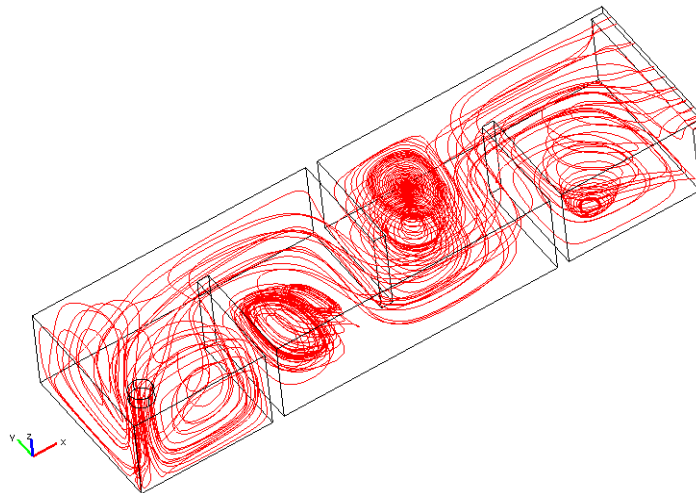
При проведенні моделювання було виведено графіки залежності зміни величини рН в часі в різних точках змішувача-реактора (рис. 3).



а)



б)



в)

Рис. 2. 3D-модельовання гідравлічного змішувача-реактора:  
а) вигляд по осях X-Y, б) вигляд у аксонометрії, в) вигляд ліній потоку

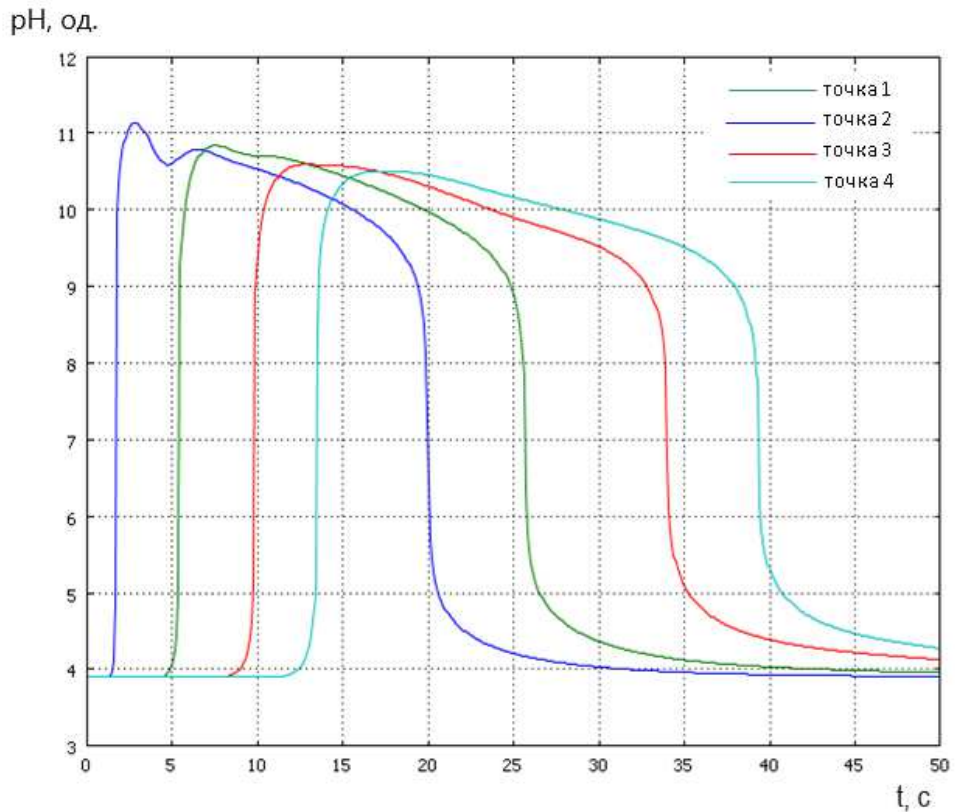


Рис. 3. Графіки залежності зміни величини рН в часі в різних точках змішувача-реактора

Також для підтвердження адекватності моделі було проведено експериментальні дослідження у промислових умовах. Результати експериментів показані на рис. 4.

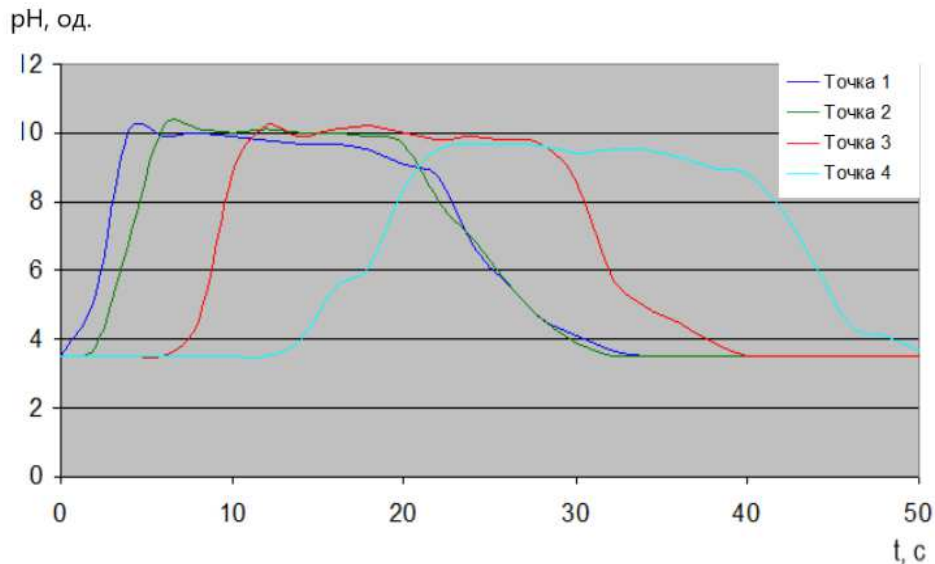


Рис. 4. Результати експериментальних досліджень в змішувачі-реакторі на ТОВ «Мелітопольський завод підшипників ковзання»

**Отже,** за результатами моделювання можна зробити висновок, що складена математична модель відповідає експериментальним залежностям, що підтверджує її адекватність. Результати проведеного моделювання можна використовувати для оптимізації геометричних розмірів згаданого змішувача-реактора, параметрів технологічного процесу для найбільш ефективного регулювання параметрів стічної води. Цей спосіб можна використовувати для регулювання параметра  $E_h$ , оскільки фізичні та технологічні принципи, що використовуються для процесів в такому типі об'єкта керування, валідні і для даного параметра. Також на основі проведених досліджень можливим є проєктування нових видів змішувачів-реакторів та нових алгоритмів керування технологічним процесом.

1. Филипчук В. Л. Очищення багатоконпонентних металовміщуючих 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 р. 6. Филипчук В. Л., Древецький В. В., Филипчук Л. В. Автоматизоване керування природоохоронними системам 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.

## 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 rH та Eh pry ochysttsi stichnykh vod vid vazhkykh metaliv. *Komunalne hospodarstvo mist* : nauk.-tekhn. zб. K. : Tekhnika, 2010. Vyp. 93. S. 151–156. 5. Patterson J. W. *Industrial Wastewater Treatment Technology*. London : Butterworth Publishers, 1995. 6. Fylypchuk V. L., Drevetskyi V. V., Fylypchuk L. V. Avtomatyzovane keruvannya 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.

---



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

**Matus S. K., Candidate of Engineering (Ph.D.), Associate Professor**  
(National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

## **MODELING AND OPTIMIZATION OF pH AND Eh REGULATION PROCESSES IN HYDRAULIC REACTORS-MIXERS AS CONTROL OBJECTS**

The process of modeling the operation of a hydraulic mixer-reactor of the partition type as a control object in the regulation of pH and Eh parameters in wastewater treatment processes is considered. The specifics of work, the physical basis of this control object and its simulation modeling in sewage treatment automation systems are defined. To adjust pH and Eh in practice, mixer-reactors are used, where the added reagent is first mixed with wastewater, and then the corresponding chemical reactions take place. For one of the types of mixer-reactors (partitioned) a three-dimensional simulation of the process of changing the pH when adding a portion of the reagent was carried out. During the simulation, graphs of the dependence of the pH value change over time at different points of the mixer-reactor were derived. Also, to confirm the adequacy of the model, experimental studies were conducted in industrial conditions. The simulation results show that the developed mathematical model corresponds to the experimental dependences. The results of the conducted research can be used to optimize the geometric dimensions of this mixer-reactor and new control algorithms for the most effective regulation of wastewater parameters.

*Keywords:* wastewater treatment; automation; pH and Eh parameters; simulation modeling.

---