

# Компьютерное моделирование процесса автоматического регулирования параметров рН и Eh промышленных сточных вод в смесителях-реакторах

Л. В. Филипчук

*Национальный университет водного хозяйства и природопользования,  
кафедра автоматизации, электротехнических и компьютерно-интегрированных технологий,  
Институт автоматизации, кибернетики и компьютерной техники,  
ул. Соборная, 11, г. Ровно, 33028, Украина, e-mail: [leonmail@ukr.net](mailto:leonmail@ukr.net)*

Приведены результаты исследования и компьютерного моделирования процессов комплексного автоматического регулирования параметров рН и Eh многокомпонентных сточных вод в смесителях-реакторах механического и гидравлического типов при реагентном способе обработки стоков.

*Ключевые слова: сточные воды, активная реакция среды (рН), окислительно-восстановительный потенциал (Eh), реагентная обработка стоков, компьютерное моделирование.*

УДК 628.16.08.001.57.001.26

## ВВЕДЕНИЕ

Характерной особенностью современных металлосодержащих сточных вод промышленных предприятий является многокомпонентность состава. Для них характерны высокие концентрации загрязнений, их значительные колебания, наличие широкого спектра органических примесей (поверхностно-активных веществ (ПАВ), фенолов, эмульгированных примесей, нефтепродуктов), минеральных солей и комплексообразующих соединений. Многокомпонентность крайне негативно влияет на процессы очистки сточных вод. Для очистки таких стоков применяют введение реагентов, способствующих осаждению металлов, сорбции органических примесей, разрушению комплексов, укрупнению мелких частиц (коллоидов), окислению или восстановлению примесей. В частности, щелочи используются для осаждения тяжелых металлов, кислоты – для подкисления очищенных сточных вод до нейтрального рН перед сбросом в канализацию или водоем. Окислители применяются для разрушения цианидов и органических примесей, восстановители – для обезвреживания такого токсичного элемента, как шестивалентный хром.

При осаждении металлов необходимо учитывать наличие в многокомпонентных сточных водах смеси тяжелых металлов, которые могут иметь различные рН осаждения, а также амфотерные свойства большинства металлов, что может привести к вторичному растворению образовавшихся малорастворимых соединений при превышении рН их осаждения [1–3].

Основными способами воздействия на окислительно-восстановительные процессы очистки многокомпонентных сточных вод является регулирование рН и окислительно-восстановитель-

ного потенциала (Eh) путем дозирования разнотипных реагентов: кислот, щелочей, окислителей или восстановителей. В то же время окислители или восстановители, которые дозируются для регулирования Eh, в силу своих химических свойств одновременно изменяют и величину рН среды. Последующая ее корректировка вызывает обратный сдвиг величины Eh. Кроме того, при протекании химических реакций также происходит изменение рН и Eh. Все это создает значительные трудности в поддержании оптимальных значений этих параметров, требует введения значительных количеств реагентов, а в ряде случаев делает невозможным достижение требуемых величин рН и Eh при использовании наиболее распространенных одноконтурных систем автоматического регулирования [4].

Разработка современных систем автоматического управления параметрами рН и Eh требует совершенствования существующих алгоритмов функционирования систем автоматического регулирования, построения адекватных математических моделей контуров регулирования и проведения компьютерного моделирования как средства оптимизации параметров системы.

Цель работы – компьютерное моделирование процессов комплексного автоматического регулирования параметров рН и Eh многокомпонентных сточных вод в смесителях-реакторах механического и гидравлического типов при реагентном способе обработки стоков.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Химический процесс окисления-восстановления токсичных примесей наиболее эффективно осуществлять в смесителе-реакторе непроточного (периодического) типа, оборудованном меха-

нической мешалкой, при использовании ступенчатого регулирования рН и Eh [4]. Это обуславливается тем, что окислительно-восстановительные реакции требуют значительного времени, дозирования нескольких реагентов, особенно при наличии органических примесей в многокомпонентной сточной воде.

В частности, принцип ступенчатого дозирования реагентов для восстановления шестивалентного хрома сульфитом натрия заключается в следующем. После наполнения механического смесителя-реактора хромсодержащими стоками в него при непрерывном перемешивании ступенчато дозируют реагенты для регулирования рН и Eh. Сначала стоки подкисляют соляной кислотой для снижения рН до оптимальной величины  $\text{pH} \leq 3,0$  (рис. 1, отрезок 1), необходимой для эффективного протекания реакции восстановления хрома (VI) в хром (III). При этом под действием кислоты величина Eh воды повышается до  $+(0,70-0,75)$  В. Далее в воду вводят раствор сульфита натрия для снижения величины Eh к первому промежуточному значению потенциала  $\text{Eh} = +(0,55-0,45)$  В (рис. 1, отрезок 2), при котором начинается реакция восстановления. С этого момента подача реагентов прекращается и протекает реакция восстановления хрома (VI) при непрерывном перемешивании сточной воды. В процессе реакции потребляются ионы водорода, в результате чего величина рН сточной воды становится (рис. 1, отрезок 3) выше критического значения  $\text{pH} > 3,0$ , что приводит к ее торможению. Далее циклы последовательного дозирования кислоты и восстановителя для постепенного ступенчатого снижения Eh и стабилизации рН повторяются до полного восстановления хрома (VI) при заданном конечном значении величины  $\text{Eh} = +(0,2)$  В. Реакция восстановления хрома (VI) считается законченной, если на заданном конечном отрезке времени стабилизации химического процесса параметры рН и Eh не будут изменяться выше установленных конечных значений.

Подобным образом ступенчатое дозирование реагентов можно применять с целью окисления цианидов, фенолов, роданидов и других токсичных примесей, которое проводится дозированием окислителей для повышения величины Eh и сопутствующим регулированием величины рН кислотами или щелочами.

Для реализации алгоритма управления и разработки системы комплексного автоматического регулирования величин рН и Eh стоков по приведенным экспериментальным данным составлена математическая модель процессов реагентной обработки стоков в механическом смесителе-реакторе периодического действия как объекте

автоматизации [5]. На основе полученной модели проведено компьютерное моделирование систем автоматического регулирования процессами восстановлением примесей сточных вод с помощью программной среды MatLab Simulink.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ экспериментальных данных показывает, что объект является многомерным, с двумя взаимосвязанными входами и выходами. По данным эксперимента найдены передаточные функции прямых и перекрестных связей между входными и выходными параметрами. Передаточная функция прямого канала регулирования рН отражает влияние расхода кислоты на изменение рН в смесителе-реакторе:

$$W_{11}(s) = \frac{0,01}{22,3s + 1}. \quad (1)$$

Передаточная функция перекрестного канала связи характеризует влияние расхода кислоты на изменение рН:

$$W_{12}(s) = \frac{-0,0012}{15,4s + 1}. \quad (2)$$

Знак «-» показывает, что рост показателя рН приводит к уменьшению показателя Eh. Определим передаточную функцию канала регулирования Eh:

$$W_{22}(s) = \frac{0,0025}{17,1s + 1}. \quad (3)$$

Передаточная функция воздействия расхода восстановителя на смену Eh сточной воды:

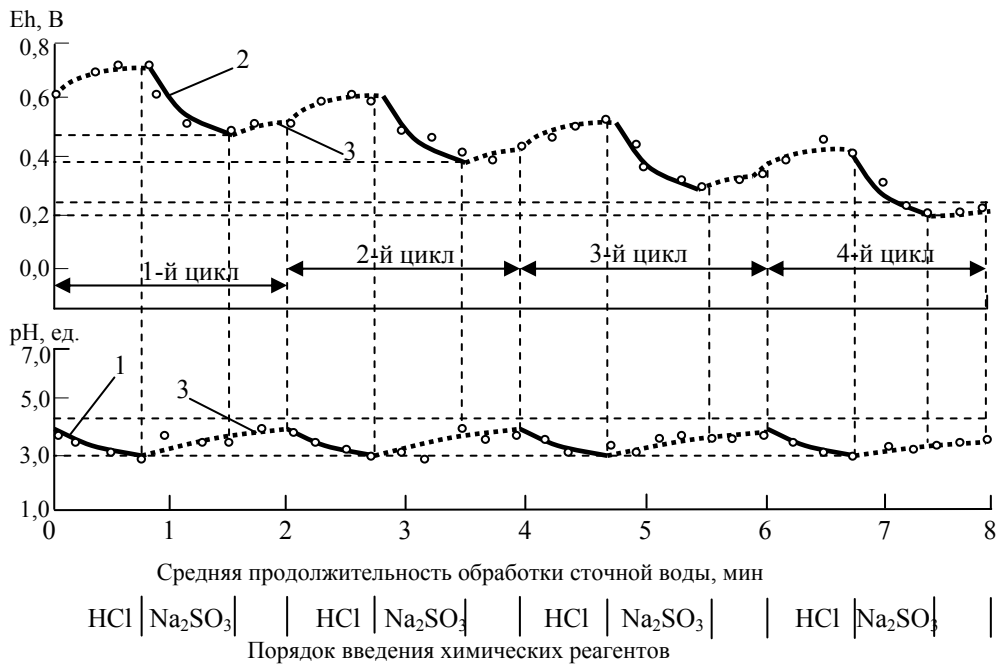
$$W_{21}(s) = \frac{-0,01}{32,6s + 1}. \quad (4)$$

На основе найденных передаточных функций проведено моделирование эксперимента в среде прикладного программного обеспечения Simulink (рис. 2).

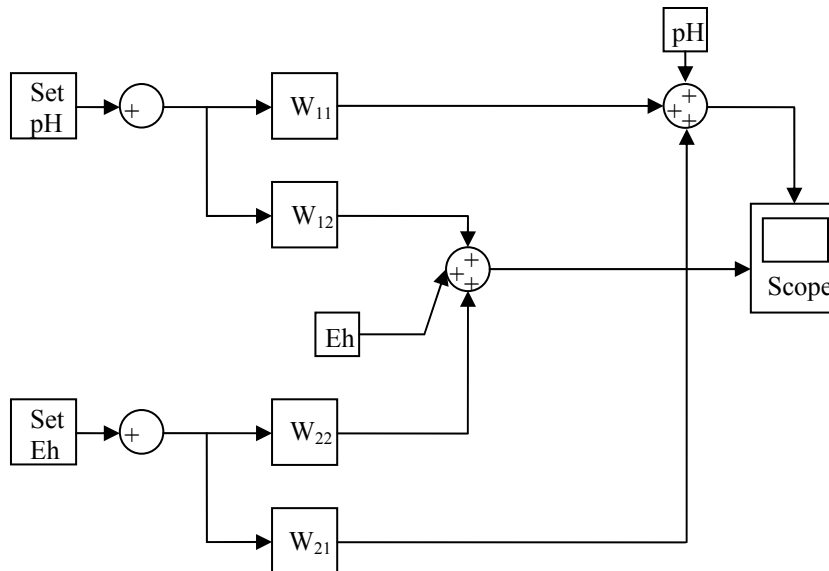
Модель, представленная на рис. 2, является разомкнутой системой программного автоматического управления, реализующей алгоритм комплексного регулирования величин Eh и рН многокомпонентных сточных вод в смесителе-реакторе периодического действия. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

Как видно из рис. 3, результаты компьютерного моделирования соответствуют экспериментальным данным (см. рис. 1), а построенная модель объекта может быть использована для отработки алгоритмов управления.

При использовании данных передаточных функций объекта управления в замкнутых системах автоматизации можно улучшить показатели качества регулирования и существенно уменьшить колебания величин рН и Eh (рис. 4). На рис. 5 показаны результаты моделирования



**Рис. 1.** Экспериментальные данные процесса восстановления шестивалентного хрома в сточных водах: 1 – область дозирования кислоты; 2 – область дозирования восстановителя; 3 – область прохождения реакций без подачи реагентов.



**Рис. 2.** MatLab модель процессов ступенчатого регулирования параметров pH и Eh хромосодержащих сточных вод, где Set pH – уставка pH, Set Eh – уставка Eh,  $W_{11}$ ,  $W_{12}$ ,  $W_{21}$ ,  $W_{22}$  – передаточные функции (см. формулы 1–4), pH, Eh – начальные значения pH и Eh, Scope – осциллограф.

замкнутой системы автоматического регулирования (САР). При моделировании использовался насос-дозатор с расчетным коэффициентом передачи  $K_H = 0,046$  мл/с.

Из данных графиков видно, что при использовании замкнутой САР регулирование происходит быстрее и точнее. Применение замкнутой САР с прямыми и перекрестными связями между входными и выходными параметрами позволяет проводить регулирование pH и Eh в смесителе-реакторе периодического действия существенно более плавно и точно, что обеспечивает необходимую степень очистки сточных вод от токсичных примесей.

Для осаждения тяжелых металлов в щелочной среде или окисления-восстановления примесей без изменения pH водной среды можно применять проточные смесители-реакторы гидравлического типа. Это объясняется тем, что время пребывания воды в проточных смесителях-реакторах значительно меньше, чем в непроточных. Однако регулирование величин pH или Eh в проточных смесителях-реакторах значительно усложняется в случае значительных колебаний загрязняющих компонентов в исходной сточной воде. Вследствие этого на очистных сооружениях происходит передозировка реагентов, что при-

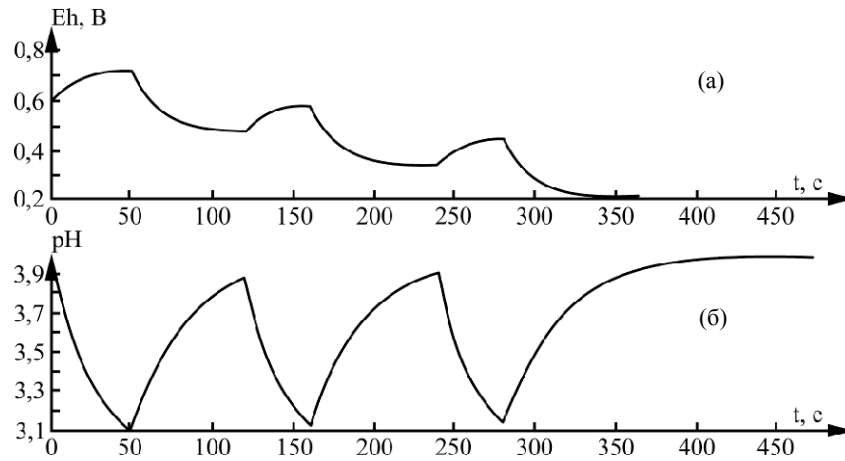


Рис. 3. Переходные характеристики объекта регулирования: (а) – по каналу Eh; (б) – по каналу pH.

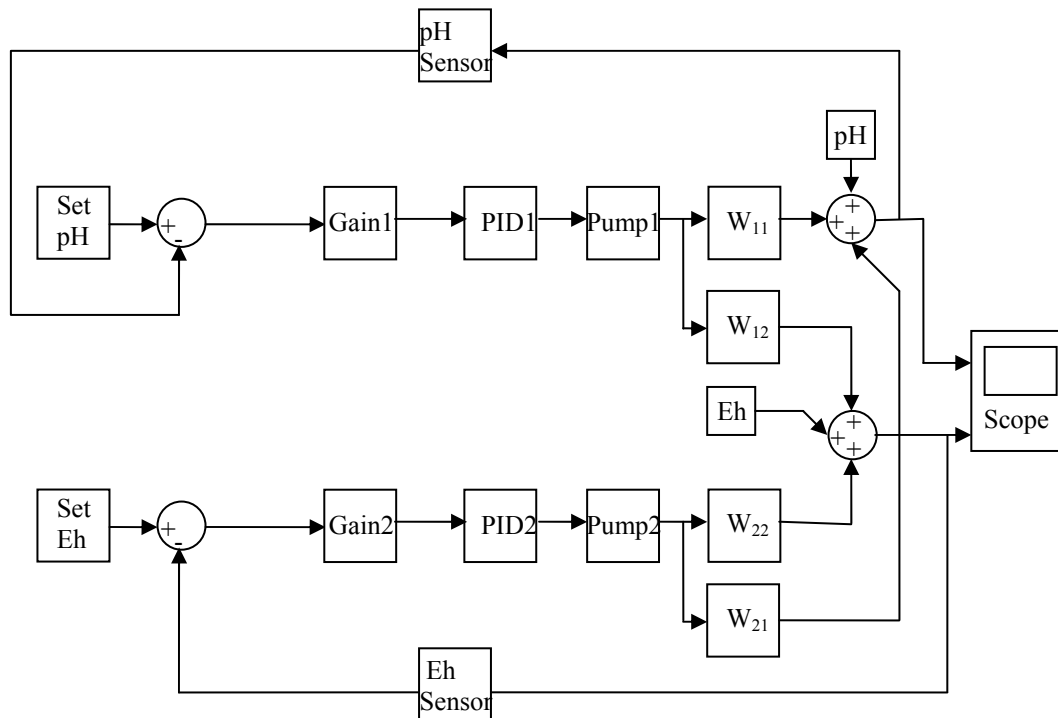


Рис. 4. Модель замкнутой системы автоматического регулирования параметров pH и Eh, где pH/Eh Sensor – соответственно блоки датчиков pH и Eh, Gain1/2 – блоки пропорциональности, PID1/2 – блоки ПИД-регуляторов pH/Eh, Pump1/2 – блоки насосов-дозаторов для дозирования кислоты/восстановителя.

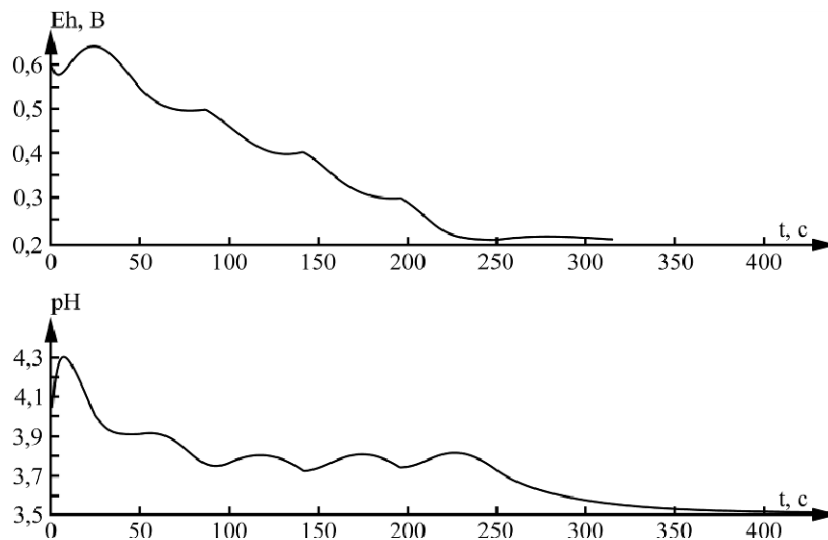


Рис. 5. Переходные характеристики замкнутой системы автоматического регулирования pH и Eh.

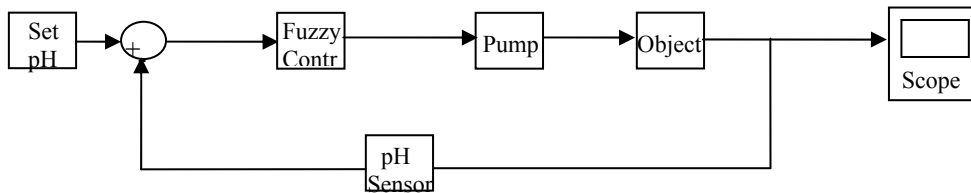


Рис. 6. Модель системы с нечетким регулятором в программе Matlab.

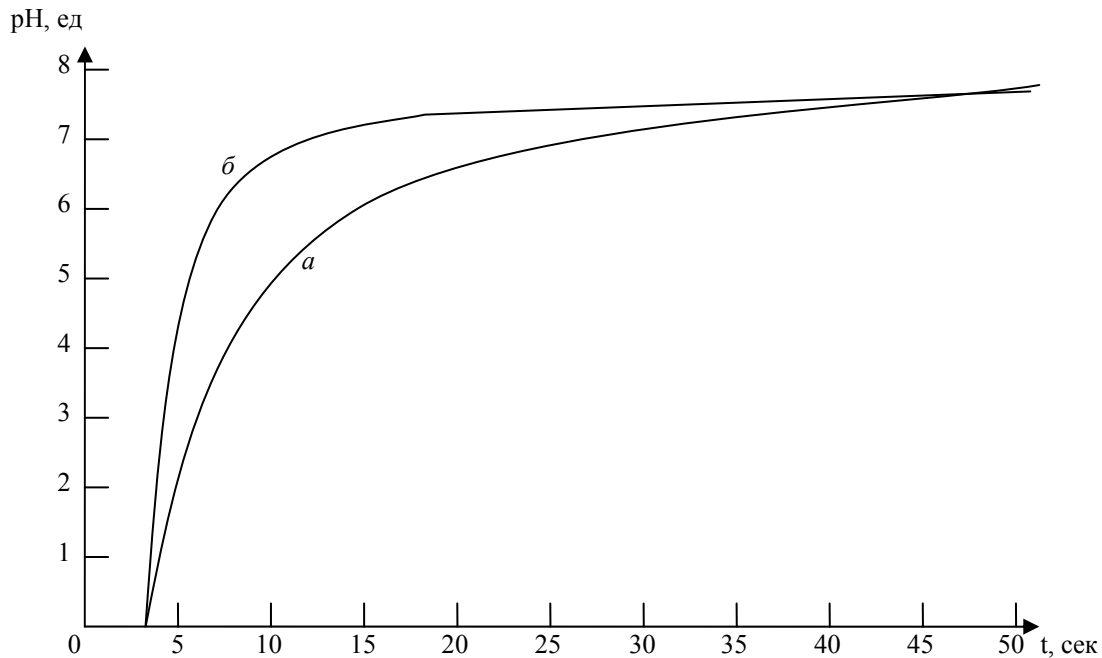


Рис. 7. Графики переходных процессов при моделировании САР с ПИД-регулятором *a* и нечетким регулятором *б*.

водит к снижению степени извлечения загрязняющих компонентов и вторичному загрязнению очищенной сточной воды избытком минеральных солей (анионами или катионами реагентов).

Для регулирования процесса изменения pH в проточных реакторах применяют регуляторы различных типов [6]. Однако использование пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов ограничено диапазоном изменения нагрузки, а также динамикой возмущений. При плохом усреднении стоков и применении смесителя-реактора с неблагоприятной динамической характеристикой рекомендуется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор. Но в условиях периодического сброса сточных вод на современных очистных станциях и многокомпонентности состава металлосодержащих вод даже одноконтурная САР с ПИД-регулятором не может обеспечить заданное качество стабилизации pH.

Для обеспечения быстрого и эффективного прохождения процесса автоматического регулирования pH или Eh предложено использовать САР с «нечетким» («fuzzy») регулятором (рис. 6). Для его сравнения с наиболее распространенным ПИД-регулятором проводилось моделирование САР. Моделируемые САР содержа-

ли одинаковые блоки с передаточными функциями, кроме блоков регуляторов.

При очистке сточных вод в предложенной САР в режиме реального времени ведется автоматический контроль за исходными значениями параметров pH или Eh. Измеренные значения преобразовываются в «нечеткую» форму, например pH = 3 преобразовывается в «мало», pH = 8 – в «средне» и т.д. На основе экспертной информации формируется база данных, где описываются возможные пары значений «четкая» переменная – «нечеткая» переменная, а также варианты решений при разных входящих условиях. Блок логических решений осуществляет процедуру выбора наиболее подходящего «нечеткого» решения из базы данных. Последним этапом нечеткого управления является преобразование «нечетких» данных в конкретные физические управляющие воздействия, которые служат уставками (заданиями) регуляторов [7].

Результаты моделирования показали (рис. 7), что при использовании САР с «нечетким» регулятором время регулирования уменьшилось вдвое по сравнению с САР с ПИД-регулятора. Применение САР с «нечетким» регулятором позволяет повысить точность дозирования и ускорить процесс выхода pH или Eh на заданные

величины, что имеет существенное значение при обработке сточных вод в проточных условиях.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, компьютерное моделирование процесса автоматического регулирования параметров pH и Eh многокомпонентных промышленных сточных вод в смесителях-реакторах различных типов дает возможность спроектировать системы автоматического дозирования реагентов, которые позволяют сократить время реагентной обработки, обеспечить точность поддержания заданных значений pH и Eh и тем самым повысить степень очистки стоков от токсичных примесей.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Maly J., Hlavinek P. *Cistení průmyslových odpadních vod*. Brno: NOEL, 2000. 255 p.
2. Филипчук В.Л. *Очищення багатоконпонентних металовміщуючих стічних вод промислових підприємств*. Рівне: УДУВГП, 2004. 232 с.
3. *Removal of Metals from Wastewater. Neutralization and Precipitation*. Edited by Georg C. Cushnie. New Jersey, USA: Noyes publication. Park Ridge, 1987. 175 p.

4. Смирнов Д.Н., Генкин В.Е. *Очистка сточных вод в процессах обработки металлов*. М.: Metallurgia, 1989. 224 с.
5. Филипчук Л.В. *Комплексне ступінчатє регулювання рН та Eh стічних вод із застосуванням системи автоматичного введення реагентів*. Рівне: Вісник НУВГП, 2011, 4(56), 64–70.
6. Коптев В.С., Манусова Н.Б. Автоматический контроль процессов электрохимической очистки хромсодержащих сточных вод. *Труды ВНИИ-ВОДГЕО. Автоматизация и управление системами водоснабжения и водоотведения*. М.: ВНИИВОДГЕО, 1988. С. 8–10.
7. Усков А.А., Кузьмин А.В. *Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика*. М.: Горячая Линия–Телеком, 2004. 143 с.

Поступила 15.10.13

После доработки 25.02.14

### Summary

The results of research and computer modelling of the processes of complex automatic control of pH and Eh parameters of multicomponent sewages in the mixers-reactors of mechanical and hydraulic type at the reagent method of treatment are presented.

*Keywords: sewage, active reaction of environment (pH), redox potential (Eh), reagent treatment of flows, computer modeling.*