

УДК 519.62:532.5:681.516.75

А.П. Сафоник<sup>1</sup>, І.М. Таргоній<sup>2</sup>, С.А. Коваль<sup>3</sup><sup>1</sup>НУВГП, м. Рівне, Україна, safonik@ukr.net;<sup>2</sup>НУВГП, м. Рівне, Україна, targoniy93@ukr.net;<sup>3</sup>НУВГП, м. Рівне, Україна, sergiy44607@gmail.com;

## МОДЕЛЮВАННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Побудовано математичну модель процесу електрокоагуляційного очищення стічних вод, що враховує геометричні розміри реактора, об'ємну витрату рідини та прикладену силу струму. Розроблено імітаційну модель, яка описує процеси, що протікають в електрокоагуляторі, на основі якої проведено дослідження впливу сили струму на концентрацію цільового компоненту на виході з реактора. На основі експериментальних даних перевірено адекватність побудованої моделі. Розроблено систему автоматизації, що забезпечує оптимальну витрату електроенергії при дотриманні екологічних норм, щодо допустимих концентрацій іонів важких металів.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯЦІЯ, АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ, СТІЧНІ ВОДИ, ЕЛЕКТРОЛІЗЕР

**А.П. Сафоник, І.М. Таргоній, С.А. Коваль. Моделирование и автоматизация процесса электрокоагуляционной очистки сточных вод.** Построена математическая модель процесса электрокоагуляционной очистки сточных вод, которая учитывает геометрические размеры реактора, объемный расход жидкости и прилагаемую силу тока. Разработана имитационная модель, которая описывает процессы, протекающие в реакторе, на ее основе проведено исследование влияния силы тока на концентрацию целевого компонента на выходе из реактора. Проверено точность полученных результатов сравним с данными эксперимента. Разработана система автоматизации, которая обеспечивает оптимальный расход электроэнергии при соблюдении экологических норм, относительно допустимых концентраций ионов тяжелых металлов.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИЯ, АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ, СТОЧНЫЕ ВОДЫ, ЭЛЕКТРОЛИЗЕР

**A.P. Safonyk, I.M. Targoniy, S.A. Koval. Simulation and automation of the electrocoagulation process for wastewater treatment.** Mathematical model of the electrocoagulation process for water treatment, which takes into account the geometric dimensions of the reactor, the volumetric flow rate and the applied current strength, was constructed. The simulation model that describes the processes occurring in the electrocoagulator has been developed, on the basis of this studied the influence of current strength on the concentration of the target component at the exit from the reactor. Based on experimental data verified the adequacy of the constructed model. A system of automation, which provides the optimal energy consumption and ensures observance of ecological standards for allowable concentrations of heavy metal ions, has been developed.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ЭЛЕКТРОКОАГУЛЯЦИЯ, АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ, СТОЧНЫЕ ВОДЫ, ЭЛЕКТРОЛИЗЕР

### Вступ

В останні роки, незважаючи на зниження темпів розвитку промисловості, суттєво загострилися проблеми із забрудненням води. Одним з шляхів забруднення є використання у виробництві хімічних методів, які дуже поширені в технологічних процесах. Проте результати хімічної обробки завжди залишаються відходи, що мають негативний вплив на довкілля. Часто для очищення таких стічних вод використовують системи, які вже давно відпрацювали свій ресурс. Час напрацювання на відмову таких систем давно вийшов і використання зношених систем не забезпечує необхідних концентрацій допустимих домішок. Перевищення допустимих концентрацій забруднення у навколишньому середовищі несе негативний вплив природним екосистемам. Тому розроблення сучасних систем водоочищення є одним з першочергових завдань для збереження довкілля.

Одним з найбільш прогресивних напрямів в технології водоочищення є метод електрокоагуляції. До переваг якого відносять: висока продуктивність, мала чутливість до зміни складу сумішей, відсутність необхідності попереднього видалення розчинених органічних речовин, наявність промислового випуску різних електрокоагуляційних установок, відсутність необхідності додаткового введення коагулянтів. Проте в даних системах є і ряд недоліків, серед яких основні: утворення великої кількості шлам, велика витрата металу анода і електроенергії [1].

### 1. Постановка задачі

Для дослідження використаємо модельну задачу процесу очищення стічних вод від забруднення запропонованому в [3]. Особливостями такої постановки проблеми є те, що в системі рівнянь (1) враховано процеси, що проходять в реакторі, як сукупність взаємодії різних факторів в залежності

від: концентрації завислих речовин у воді, прикладеної сили струму, швидкості потоку та температур рідини, зовнішнього середовища, води в реакторі, конструктивних параметрів коагулятора:

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = \frac{L}{V}(C_{in} - C) - (a_0 + a_1T + a_2C + a_3I); \\ \tau \frac{dT}{dt} = \frac{(a_0 + a_1T + a_2C + a_3I)VH}{KS} - (T - T_z) - \\ - \frac{c\rho L(T - T_{in})}{KS}, \end{cases} \quad (1)$$

$$C(0) = C_0, T(0) = T_0. \quad (2)$$

де  $C$  – концентрація цільового компонента у воді;  $C_{in}$  – концентрація забруднення на вході в електролізер;  $T$  – температура води в реакторі;  $T_z$  – температура зовнішнього середовища;  $T_{in}$  – температура вхідної рідини;  $I$  – сила струму;  $a_0 \dots a_3$  – емпіричні коефіцієнти;  $S$  – площа поверхні робочої зони апарата;  $L$  – об’ємні витрати рідини;  $V$  – об’єм робочої зони електролізера;  $c$  – питома теплоємність рідини;  $\rho$  – густина води;  $K$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $H$  – тепловий ефект процесу (реакції електрокоагуляції);  $\tau$  – стала часу;  $T$  – час.

## 2. Огляд літератури

Ряд авторів [1-5] займаються дослідженням процесу очищення стічних вод методом електрокоагуляції. При проведенні електрокоагуляційних експериментів виникають проблеми [5] при:

– виборі оптимальних режимів роботи електрокоагулятора в зв’язку з тим, що на рідину діють електромагнітні сили, хімічні процеси в самій рідині і фізико-хімічні процеси в приелектродному просторі;

– врахуванні основних параметрів процесу, оскільки вплив на процес електрокоагуляції здійснюють тип струму (постійний, змінний чи реверсивний), величина прикладеної напруги, матеріал електродів, форма електродів (плоскі, трубчасті, коробчасті, пластинчасті), відстань між електродами, чистота поверхності електродів, а також гідравлічні і термодинамічні процеси і їх зміна в часі.

В основному для опису процесів, що протікають в реакторі використовують математичні моделі, що враховують лише частину параметрів електрокоагуляції. Авторами [3] запропоновано математичну модель електролізера, яка враховує ряд важливих параметрів, якими можна впливати на швидкість і якість протікання процесу електрокоагуляції. Проте для повноти отримання інформації необхідно дослідити вплив на концентрацію завислих речовин зміну густини струму, що є основним керуючим параметром. В роботі [5] процес електрокоагуляції розглядається з точки зору

експериментів; досліджено зміну концентрації забруднення при різних значеннях густини струму, витрати рідини, кислотності середовища. Проте виведена математична модель описує лише реактор даних геометричних розмірів з зміною основних збурень в заданих межах і не враховує вплив зміни температури води на якість очищення.

Враховуючи вище сказане, метою даної роботи:

1) розробити модель процесу електрокоагуляційної очистки стічних вод, яка враховує процеси, що протікають в середині реактора та дає можливість змінювати керуючі впливи, такі як: величина сили струму, швидкість потоку рідини, геометричні розміри реактора та вхідна концентрація завислих речовин;

2) провести імітаційне моделювання та отримати розв’язок відповідної модельної задачі з використанням додатку Simulink середовища MatLab;

3) перевірити точність отриманих результатів шляхом порівняння з експериментальними даними;

4) дослідити вплив величини сили струму на якість очищення стічних вод при змінній вхідній концентрації забруднення;

5) розробити систему автоматизації, яка мінімізує витрати електроенергії на очищення стічних вод при дотриманні встановлених екологічних норм концентрацій забруднень.

## 3. Матеріали і методи

Для моделювання роботи системи рівнянь (1)-(2) використаємо додаток Simulink програмного середовища Matlab, який дає можливість будувати графічні блок-діаграми, імітувати динамічні системи, досліджувати працездатність систем і вдосконалювати проекти [6].

Для знаходження розв’язку системи використано додаток Simulink програмного пакету Matlab в якому розроблено імітаційну модель об’єкта (рис. 1, а). До вхідних параметрів даної моделі відносяться: концентрація забруднення на вході в електролізер, об’ємна витрата рідини, об’єм робочої зони реактора, прикладена сила струму, тепловий ефект реакції електрокоагуляції, коефіцієнт тепловіддачі коагулятора, площа поверхні робочої зони апарата, температури зовнішнього середовища та вхідної рідини, стала часу нагрівання, питома теплоємність та густина рідини, а вихідним параметром буде концентрація забруднення цільового компонента на виході з реактора.

Для дослідження впливу зміни величини струму на якість очищення стічних вод розроблено імітаційну модель (рис. 1, б), яка складається з 3 реакторів в яких всі вхідні дані є спільними крім густини струму. Для наочності концентрації забруднення

при різній величині сили струму відображаються в одній координатній площині.

Для підтвердити адекватність моделі використовуємо експериментальні дані з [5], що представлені в табл. 1 та отримані дані моделювання відповідно до параметрів при яких проводили експерименти. Використавши стандартні засоби побудови графіків Matlab розмістимо результати моделювання з даними експерименту за однакових вихідних даних і порівняємо.

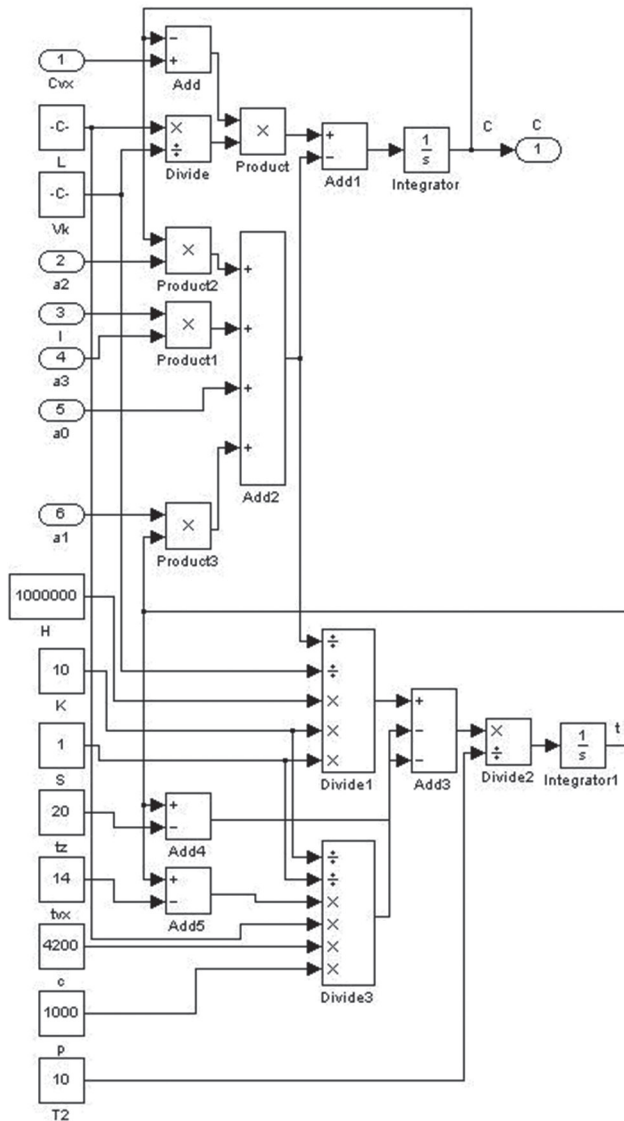
Підтвердивши адекватність моделі та провівши дослідження впливу сили струму на вихідну концентрацію забруднення виникли передумови для розробки системи автоматизації.

В основі енергоефективного керування виробництвом лежать принципи автоматизованого керування. Вихідні дані з таблиці дозволяють розробити П-регулятор для електрокоагулятора запропонованих режимів роботи Оскільки наша

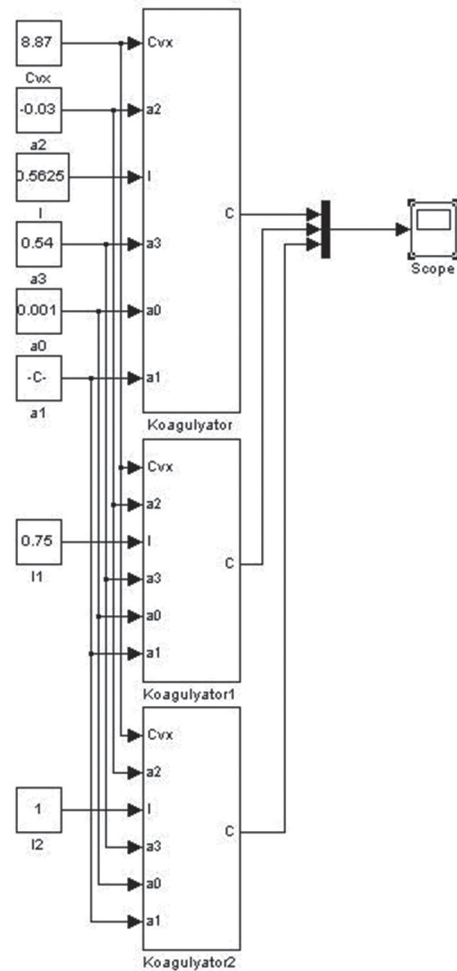
Таблиця 1

**Вихідні дані експерименту**

Час, хв	Густина струму $i$ , А/м <sup>2</sup>		
	9	12	16
	Сила струму модельного електролізера, А		
	0,5625	0,75	1
Концентрація іонів нікелю, мг/л			
0	8,87	8,87	8,87
5	6,23	5,9	5,24
10	4,22	5,4	4,71
15	3,84	5,33	4,67
20	3,29	3,81	4,64
25	3,06	3,69	3,27
30	2,81	3,43	3,1
35	2,67	3,17	3,03



а



б

Рис. 1. Simulink модель роботи електрокоагулятора (а) та Simulink модель дослідження впливу сили струму на концентрацію забруднення цільового компонента на виході з реактора (б)

система має дуже низьку інерційність по каналу регулювання і відсутні збурення які змінювали б концентрацію іонів нікелю після вимірювання датчик в системі не є доцільним використовувати ПІ або ПІД регулятор, що ускладнить розробку системи, тому достатньо П-регулятора. Щоб отримати налаштування під нашу систему ми з допомогою програми Matlab провели апроксимацію даних з табл. 2 для отримання коефіцієнтів поліноміального ряду. При цьому використовували функцію polyfit:

```
>> C=[8.87 4 5 6 7 8 10 15 20 30];
>> I=[0.75 0.132 0.258 0.385 0.511 0.638 0.891 1.524
2.155 3.421];
>> polyfit(C,I,1)
ans = 0.1265 -0.3738
```

В результаті отримали залежність зміни сили струму від вхідної концентрації іонів нікелю, що представлено рівнянням 3 та виступає в системі як П-регулятор.

$$I = 0,1265 * C_{in} - 0,3738 \quad (3)$$

При підборі приладів для апаратної реалізації системи перевага надавалася приладам, засобам автоматики та обчислюваної техніки серійного виробництва провідних фірм, таких як Schneider Electric, Siemens, Omron та інші. На вибір впливали такі параметри контрольованого середовища (тиск, витрата, температура, механічні впливи, умови середовища контролю та вимірювання), характер і розміри контрольованого об'єкта, продуктивність установки, умови охорони праці. Також враховувалися такі вимоги до засобів автоматизації, як точність, чутливість, інерційність. Уніфікована апаратура полегшить експлуатацію системи.

На основі отриманих даних розроблено функціональну схему автоматизації процесу очищення стічних вод методом електрокоагуляції, яка представлена на рис. 6. Всі функції регулювання та контролю основних параметрів у проектованій системі автоматизації виконує програмований логічний контролер S-7 300 підприємства "Siemens" з модулями розширення, аналогових входів SM331, аналогових виходів SM332 та дискретних входів/виходів SM323, який при даній конфігурації має 2 аналогові входи, 2 аналогові виходи, 8 дискретних входів і 8 дискретних виходів, яких достатньо для керування даною системою.

Для забезпечення допустимої концентрації домішок у стічних водах використовується система, до складу якої входять електрокоагулятор, пісколовка, первинний відстійник, первинний освітлювач, аераційний басейн, 3 давача рівня осаду, датчик концентрації шестивалентного хрому у воді, програмованого логічного контролера S7-300,

3 регулюючі клапани, частотно керований компресор.

Дана система має 4 контури регулювання, які забезпечують на відповідному рівні такі технологічні параметри:

- 1) Концентрація іонів нікелю на виході з електрокоагулятора.
- 2) Рівень важких мінеральних домішок(піску) в пісколовці.
- 3) Рівень осаду в відстійнику.
- 4) Рівень осаду в електрокоагуляторі.

Для реалізації даного проекту використовуючи Simatic Step7 написано програму керування процесом, попередньо налаштувавши апаратне забезпечення контролера та створено символну таблицю, в якій описані всі входи, виходи, мітки з їх символними, апаратними іменами та коментарями.

В розробленій системі програма керування роботою системою очищення стічних вод від домішок написана на мові драбинкових діаграм (Ladder Language – LD).

Для забезпечення допустимої концентрації іонів нікелю в стічних водах використовується система до якої входять аналізатор з аналоговим вихідним сигналом, контролер, випрямляч, який керує величиною поданої напруги на електрокоагулятор. Сигнал з уніфікованого давача надходить до контролера, де обробляється відповідно до меж вимірювання концентратоміра в OB1 network1. Отримане реальне значення вмісту концентрації іонів нікелю у воді тримається за адресою MD14, яке в наступному блоці програми обробляється відповідно до отриманої залежності зміни допустимої концентрації домішок від вхідної концентрації. Спочатку реальне значення на вході в електрокоагулятор масштабується і додається коефіцієнт зміщення і таким чином визначається оптимальне значення прикладеної напруги, що мінімізує витрати електроенергії, але подається на аналоговий вихід контролер через час T1 за який вода надійде від входу електрокоагулятора до робочої зони. Отриманий сигнал з контролера надходить на регулятор, який підсилює сигнал і керує величиною прикладеної напруги, що визначає концентрацію іонів нікелю. Саме такий алгоритм керування реалізовано в контролері і представлено на рис. 7. Для моніторингу роботи системи в реальному часі розроблено вікно візуалізації в середовищі WinCCFlexible, що показано на рис. 8, яке дає можливість оператору в реальному часі слідкувати за роботою очисних споруд. Також системою передбачено автоматичний і ручний режим роботи для якісного догляду за встановленим обладнанням і можливістю віддаленого керування системою.

#### 4. Експерименти

На основі розробленої моделі рис. 1 проведено дослідження впливу величину сили струму на концентрацію іонів нікелю. В якості вихідних даних використовували ДСТУ згідно з яким концентрація іонів нікелю у стічних водах не повинна перевищувати 3,2 мг/л, але в зв'язку з інерційністю регулятора та системи в якості допустимої концентрації домішок використаємо завдання 3,0 мг/л. Також для моделювання використовували експериментальні дані з табл. 1 згідно з якими за 35 хв система повинна забезпечувати допустиму концентрацію домішок. Отже при моделюванні керувалися наступним принципом: за 35 хвилин система має очистити концентрацію іонів нікелю до 3,0 мг/л. При зміні концентрації забруднення на вході отримували значення сили струму, яку необхідно прикласти, а результати наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Залежність сили струму від вхідної концентрації іонів нікелю для оптимального керування

№	Концентрація іонів нікелю, мг/л	Сила струму, А
1	8,87	0,75
2	4	0,132
3	5	0,258
4	6	0,385
5	7	0,511
6	8	0,638
7	10	0,891
8	15	1,524
9	20	2,155

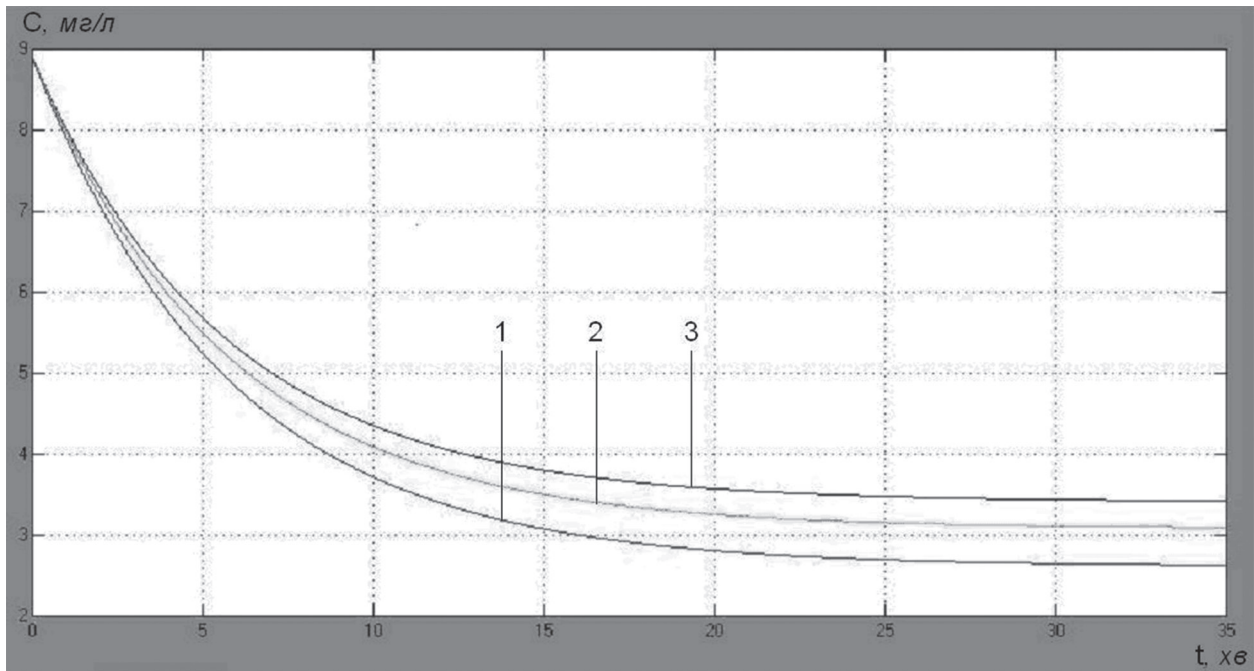


Рис. 2. Зміна концентрації забруднення іонами нікелю на виході з коагулятора з часом при силі струму  $I = 0,5625 \text{ A}$  — крива 3,  $I_1 = 0,75 \text{ A}$  — крива 2,  $I_2 = 1 \text{ A}$  — крива 1

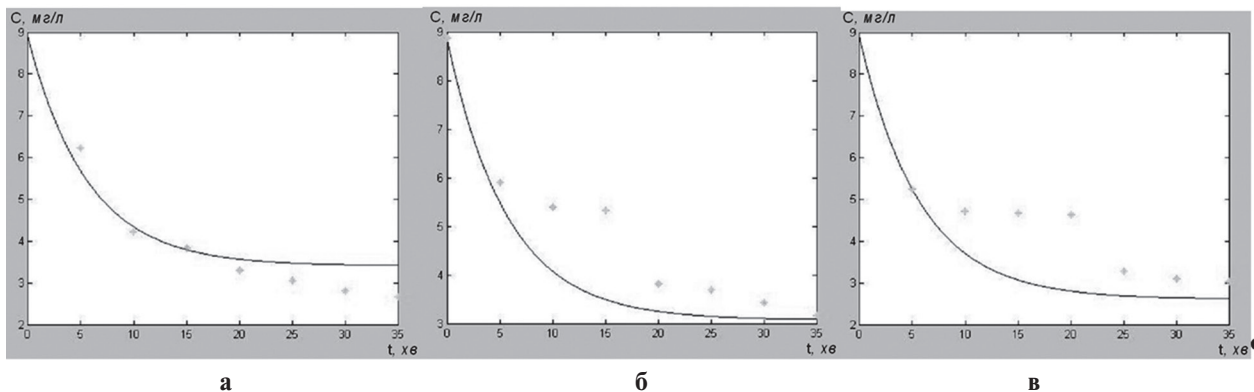


Рис. 3. Зміна концентрації забруднення від часу при густині струму  $I = 9 \text{ A/m}^2$  — а,  $I = 12 \text{ A/m}^2$  — б та  $I = 16 \text{ A/m}^2$  — в

### 5. Результати

Шляхом комп'ютерного моделювання за наведеними вхідними даними:  $C_{in}|_{t=0} = 8,87 \text{ мг/л}$ ,  $T|_{t=0} = 18^\circ\text{C}$ ,  $L = 0,006 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $V = 0,03125 \text{ м}^3$ ,  $H = 1 \text{ МДж/г}\cdot\text{с}$ ,  $K = 10 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}$ ,  $S = 1 \text{ м}^2$ ,  $T_z = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{in} = 14^\circ\text{C}$ ,  $c = 4200 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $\tau = 10$ ,  $a_0 = 0,001$ ,  $a_1 = 0,000007$ ,  $a_2 = -0,03$ ,  $a_3 = 0,54$  — отримали такі результати (рис. 2). Використавши експериментальні дані з табл. 1 та результати моделювання системи при різній величині струму з допомогою стандартних засобів Matlab побудували отримані результати на сітці дослідних даних (рис. 3) для наочності відображення точності моделі. Для перевірки роботи регулятора розроблено

імітаційну модель, що представлена на рис. 4, яка складається з двох субсистем “Regulator” рис. 4 б, “Coagulator” рис. 4а.

В підсистемі “Regulator” реалізовано залежність 3, яка оптимізує силу струму, що протікає між катодом і анодом та дозволяє економити витрати електроенергії. Проте в реальних системах струм не міняється миттєво, а інерційно, тому додатково введено передавальну функцію, яка описує інерційність системи.

Після проведення моделювання отримано результати, які представлено на рис. 5, де в якості вхідної концентрації забруднення використано випадковий сигнал, що формується блоком “Random number” (рис. 5 а).

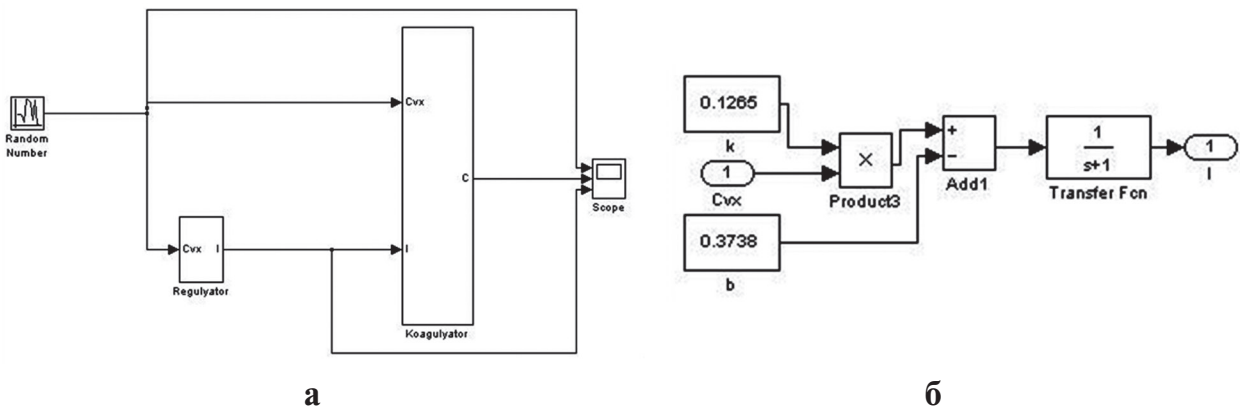


Рис. 4. Імітаційна модель для перевірки роботи системи а) та імітаційна модель регулятора б)

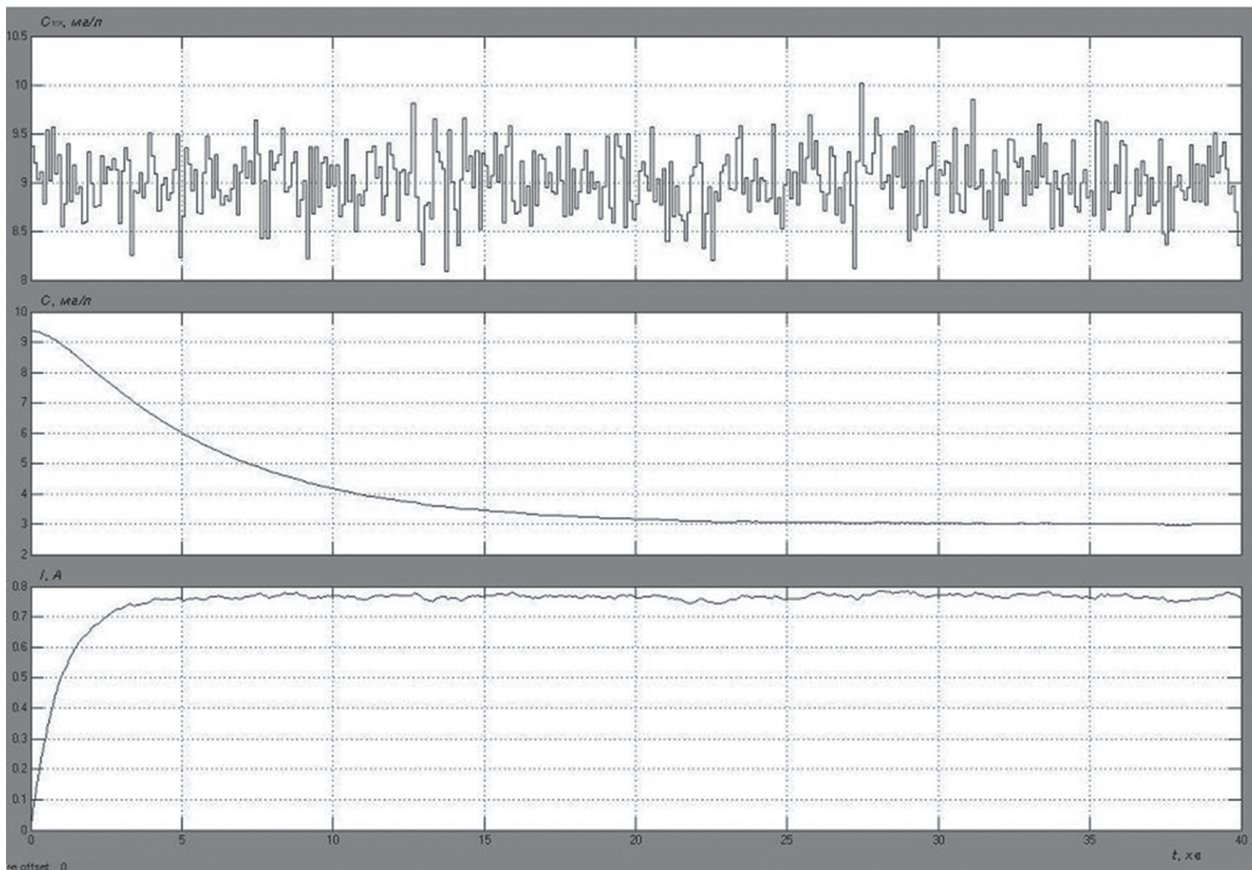


Рис. 5. Зміна вхідної концентрації, концентрації забруднення та сили струму при роботі П-регулятора

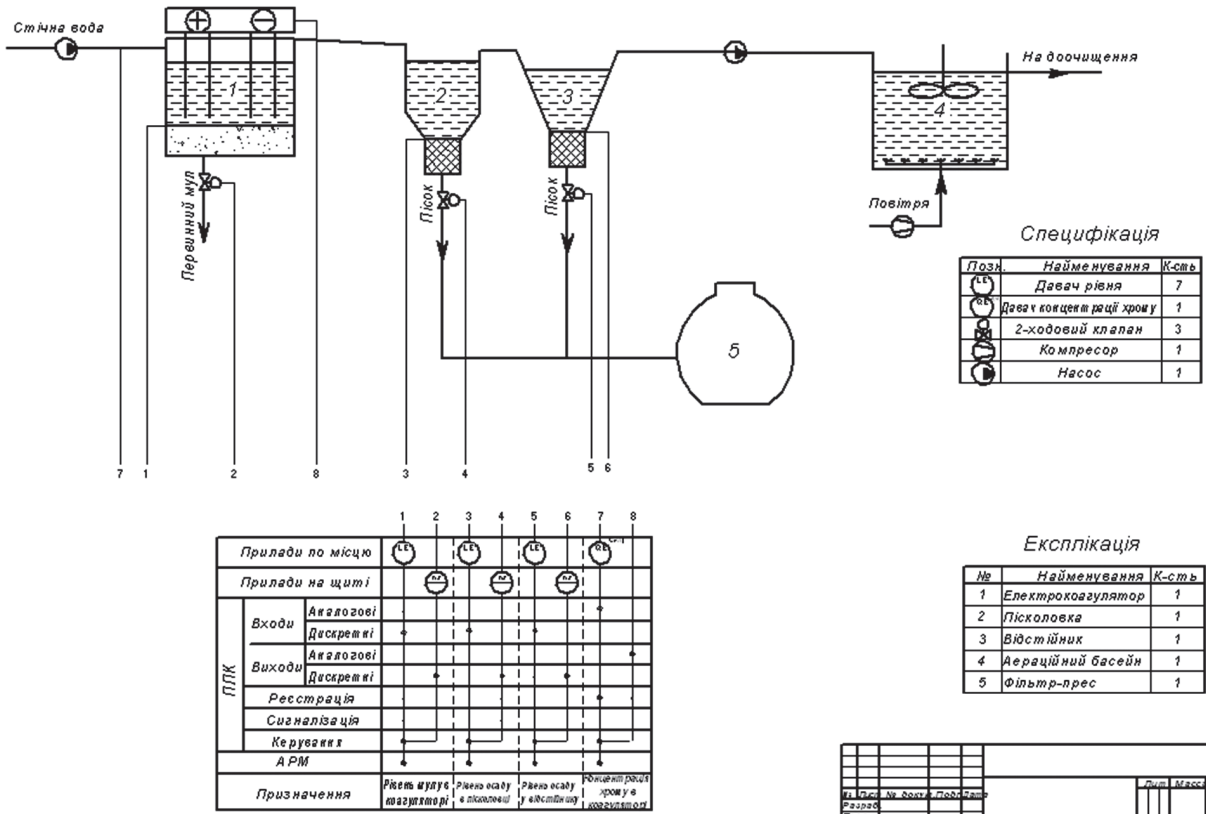


Рис. 6. Функціональна схема автоматизації роботи електрокоагулятора

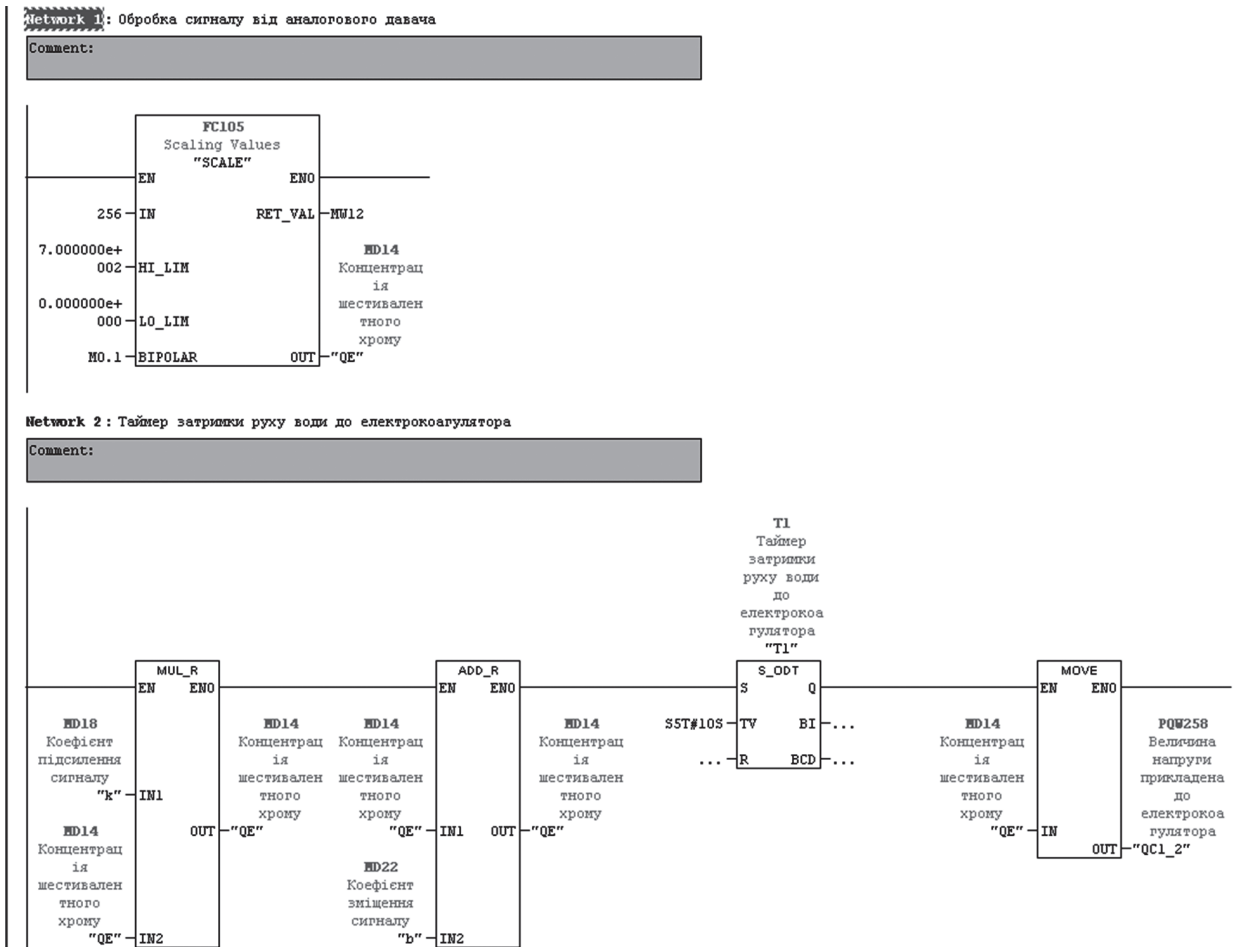


Рис. 7. Підпрограма для забезпечення допустимої концентрації іонів нікелю.

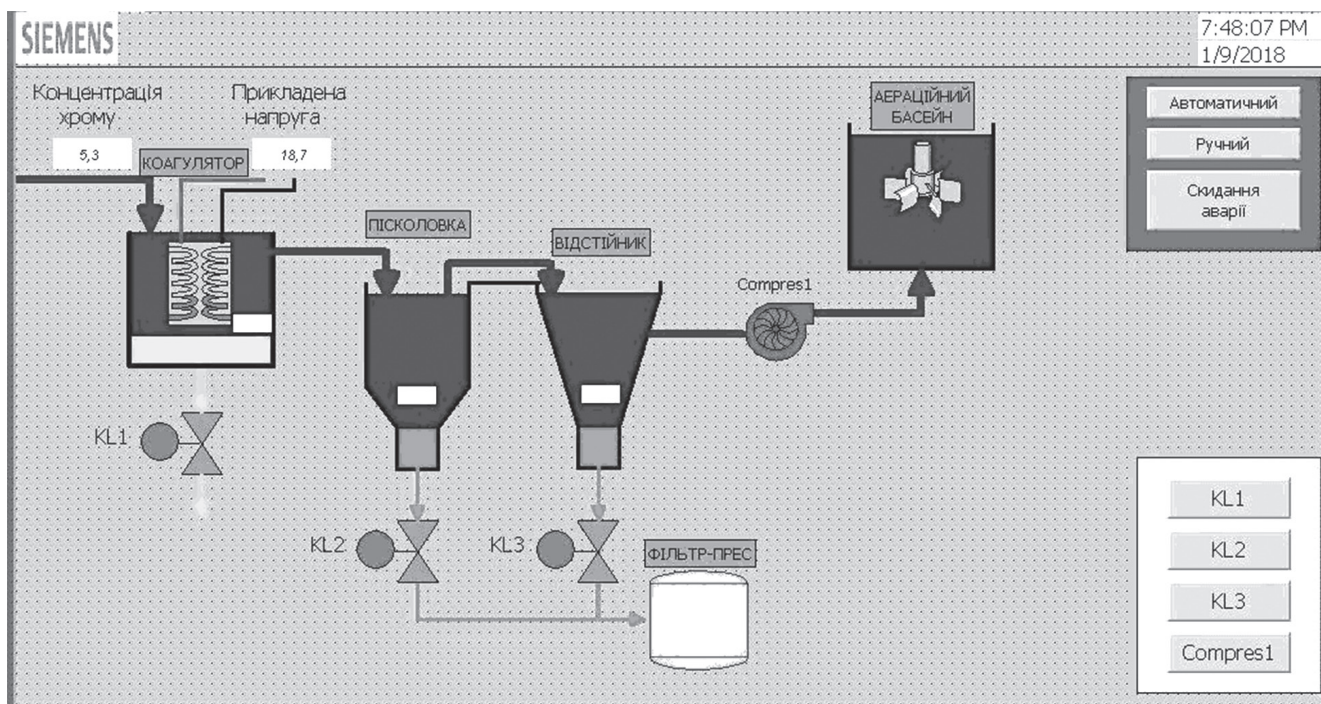


Рис. 8. Мнемосхема процесу для керування роботою електрокоагулятора

При проведенні експериментів за основу бралися дані, що вхідна концентрація змінюється в межах 8-10 мг/л, а на виході повинна бути згідно екологічних норм не більше 3,5 мг/л. Згідно технологічних вимог витрата коагулянту має бути 25 л/год. Щоб забезпечити задані умови при розмірах реактора згідно з експериментальними даними необхідно підтримувати силу струму на випрямлячі 0,9 А при 24 В постійного струму з використанням лінійного регулятора, що відповідає 8,25 А джерелу живлення 220 В змінного струму по якому і відбувається оплата за електроенергію. За добу роботи даного електрокоагулятора без системи автоматизації лише на випрямляч буде використовуватися 44,9 кВт \* год електроенергії.

Згідно результатів моделювання при використанні запропонованої системи автоматизації з П-регулятором сила струму між електродами в середньому дорівнюватиме 0,7289 А. В колі джерела живлення відповідно буде 6,68 А. Таким чином за добу витрати електроенергії, які споживатиме випрямляч дорівнюватимуть 35,3 кВт \* год. Отже запропонована система автоматизації, що представлена на рис. 6-8 дозволить зекономити до 21,4% витрат на електроенергію. З врахуванням того, що експериментальна установка підтримує силу струму не більше 1 А, а в промислових системах струм між електродами рівний порядку 80 А застосування даної системи дозволить дотримуватися екологічних стандартів із значною економією коштів при оплаті рахунків за електроенергію.

## 6. Обговорення

На рис. 2 показано, що в початковий момент часу на всіх моделях однакові значення вхідної концентрації цільового компонента. Проте з часом в залежності від густини струму чітко видно, що якість очищення стічних вод краща там де більша сила струму. По суті, отримана модель дозволяє з оптимальними параметрами розрахувати при якій величині прикладеної сили струму будуть забезпечуватися задані показники концентрації цільового компонента, що відповідають встановленим екологічним нормам. Також отримана модель дозволяє дослідити динаміку зміни вихідної концентрації забруднення не тільки при сталих вхідних параметрах, але й при змінних, що відповідає реальним процесам.

Представлені результати експериментів (табл. 1) і моделювання на рис. 3 свідчать про те, що отримана модель адекватно описує зміни, що проходять в реакторі. Відхилення, які найбільш видно на рис. 3 в) зумовлені розбіжністю і неточністю проведення експерименту, проте відмінно вказують характер і порядок зміни вихідної величини.

Згідно з рисунком 5 видно, що розроблена система автоматизації реагує на зміну вхідної концентрації забруднення і керує силою струму так, щоб згідно з розрахунками, які представлено в таблиці забезпечувалися мінімальні витрати електроенергії. Проте при такому керуванні видно на рис. 5, що концентрація іонів нікелю не перевищує встановлені норми.



### Висновки

Побудовано математичну модель, що описує закономірності процесів зміни концентрацій забруднення від прикладеної сили струму, об'ємної витрати рідини та геометричних розмірів реакторів. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням додатку Simulink середовища MatLab. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації цільового компоненту на виході з коагулятора при зміні прикладеної сили струму. На основі отриманих результатів та експериментальних даних проведено порівняльну характеристику точності проведених розрахунків. Розроблено систему автоматизації для оптимального керування процесом на основі розрахунку мінімальних витрат електроенергії на очищення стічних вод, що забезпечує встановлені екологічні норми концентрацій забруднень на основі повних даних щодо розмірів реактора, витрат рідини, вхідних концентрацій.

### Список літератури:

1. *Кругликов С.С., Тураев Д.Ю., Бородулин А.А.* Локальная электрохимическая очистка промывных вод гальванотехники от ионов тяжелых металлов в щелевом диафрагменном электрокоагуляторе с нерастворимым анодом. // Гальванотехника и обработка поверхности. — 2004. — 12, № 4. — С. 35.
2. *Taheri, Mahsa & Alavi Moghaddam, Mohammad Reza & Arami, Mokhtar.* (2014). A comparative study on removal of four types of Acid Azo dyes using electrocoagulation process. *Environmental Engineering and Management Journal*. 13. 557-564.
3. *Гончаров Ф.І.* Аналітичне дослідження електролізних процесів системи безпечного водопостачання промислових об'єктів / Ф.І. Гончаров, В.М. Штепа // Вісник НАУ. — 2010. — № 10. — С. 240-244.
4. *Кульский, Л.А.* Очистка воды электрокоагуляцией. / Л.А. Кульский, П.П. Строкач, В.А. Слипченко, Е.И. Сайгак. К.: Будівельник, -1978. — 112с.
5. *Филатова Е.Г.* Оптимизация параметров электрокоагуляционного процесса на основе математического моделирования / Е.Г. Филатова, Е.В. Кудрявцева, А.А. Соболева // Вестник ИрГТУ. — 2013. — № 4(75). — С. 117-123.
6. *Черных И.В.* Simulink: среда создания инженерных приложений. Диалог-МИФИ. 2003.
7. *Safonyk A.* Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient. *Int. J. Math. Models and Methods in Appl. Sciences*. 2015. № 9. P. 189–192.
8. *Samir, Ahmed & Chelliapan, Shreeshivasan & Zakaria, Zuriati & Ajeel, Mohammed & Alaba, Peter.* (2016). A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater. *Reviews in Chemical Engineering*. 33. 263-292. 10.1515/revce-2016-0019.
9. *Moussa, Dina & El-Naas, Muftah & Nasser, Mustafa & Al-Marri, Mohammed.* (2016). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*. 186. . 10.1016/j.jenvman.2016.10.032.
10. *Sandoval, Miguel & Fuentes-Ramirez, R & Nava, José & Rodriguez, Israel.* (2014). Fluoride removal from drinking water by electrocoagulation in a continuous filter press reactor coupled to a flocculator and clarifier. *Separation and Purification Technology*. 134. 163–170. 10.1016/j.seppur.2014.07.034.
11. *Jean Nepo, Hakizimana & Bouchaib, Gourich & Chafi, Mohammed & Stiriba, Youssef & Vial, Ch & Drogui, Patrick & Jamal, Naja.* (2017). Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*. 404. 1-21. 10.1016/j.desal.2016.10.01.
12. *Y. Yavuz, Ü.B. Ögütveren,* Treatment of industrial estate wastewater by the application of electrocoagulation process using iron electrodes, *Journal of Environmental Management*, Volume 207, 2018, Pages 151-158.
13. *Atousa Ghaffarian Khorram, Narges Fallah,* Treatment of textile dyeing factory wastewater by electrocoagulation with low sludge settling time: Optimization of operating parameters by RSM, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 6, Issue 1, 2018, Pages 635-642.
14. *Jung Hwan Kim, Byung min An, Dae Hwan Lim, Joo Yang Park,* Electricity production and phosphorous recovery as struvite from synthetic wastewater using magnesium-air fuel cell electrocoagulation, *Water Research*, Volume 132, 2018, Pages 200-210.

Надійшла до редколегії 22.05.2018