

УДК 519.62:532.5:681.516.75:004.932.2

DOI: 10.31891/2219-9365-2021-67-1-14

САФОНІК А. П., ГРИЦЮК І. М., МІЩАНЧУК М. М.,  
Національний університет водного господарства та природокористування  
ІЛЬКІВ І. В.

Рівненський державний гуманітарний університет

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ОТРИМАННЯ КОАГУЛЯНТУ НА ОСНОВІ ФОТОКОЛОРИМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ

*Розроблена модельна задача для процесу електрокоагуляційного очищення промислових стічних вод з урахуванням зміни напруги і сили струму. Проведено комп'ютерне моделювання зміни концентрації заліза на виході з електрокоагулятора з часом при змінній величині струму. Розроблена структура лабораторної установки інформаційної системи електрохімічного отримання коагулянту на основі фотоколометричного аналізу на базі якої проведено експериментальне дослідження процесу, визначено концентрацію загального та трьохвалентного заліза, силу струму та колірність речовини в різні моменти часу зі зміною напруги. В ході опрацювання результатів побудовано графічні залежності RGB-складових кольору води та відповідної концентрації загального заліза і  $Fe^{3+}$  у воді.*

*Ключові слова:* фотоколометричний аналіз, інформаційна система електрохімічного отримання коагулянту, RGB.

A. SAFONYK, I. HRYTSIUK, M. MISHCHANCHUK

<sup>1</sup>National University of Water and Environmental Engineering

I. ILKIV

Rivne State University of Humanities

## INFORMATION SYSTEM OF ELECTROCHEMICAL OBTAINING OF COAGULANT ON THE BASIS OF PHOTOCOLORIMETRIC ANALYSIS

*The development of technology, demand for goods and natural resources have led to increased pollution of the aquatic environment and the environment in general. Therefore, many scientists and environmentalists give priority to programs to clean the aquatic environment and improve the state of the ecosystem. Currently, water quality has declined dramatically and has a detrimental effect on aquatic ecosystems, nature and humanity. All this leads to the need to introduce techniques and methods for wastewater treatment and control. The effectiveness of any cleaning method is characterized by the quality, time required to perform it, the use of resources and a number of other parameters.*

*A model problem for the process of electrocoagulation treatment of industrial wastewater taking into account changes in voltage and current is developed. Computer simulation of the change in the concentration of iron at the outlet of the electrocoagulator over time at a variable current was performed. The structure of the laboratory installation of the information system of electrochemical coagulant production is developed on the basis of photocolometric analysis on the basis of which an experimental study of the process is carried out. During the processing of the results, graphical dependences of RGB-components of water color and the corresponding concentration of total iron and  $Fe^{3+}$  in water were constructed.*

*Key words:* photocolometric analysis, information system of electrochemical coagulant production, RGB.

**Постановка проблеми.** Розвиток технологій, попиту на товари та природні ресурси призвели до збільшення забруднення водного середовища та екології в цілому. Тому багато науковців та екологів надають пріоритети програмам з очищення водного середовища та покращення стану екосистеми. На даний час якість води надзвичайно знизилась та несе згубний вплив на водні екосистеми, природу та людство. Все це приводить до необхідності запровадження прийомів та методів для очистки та контролю стічних вод. Ефективність будь-якого методу очищення характеризується якістю, часом, що необхідний для його виконання, використанням ресурсів та низкою інших параметрів.

На практиці водопідготовки все частіше знаходять застосування невеликі установки реагентної очистки стічних вод. Обладнання станцій очистки води такими установками особливо є актуальним для об'єктів сільського господарства, легкої промисловості тощо. Однак використання реагентів потребує створення служби доставки і зберігання. Електрохімічні методи дозволяють отримувати реагенти на місці із доступної сировини. Один із таких методів – метод електрокоагуляції. Метод електрокоагуляції є передовим в напрямку очищення стічних вод, використовується довгі роки та не перестає розвиватися до тепер. Останнім часом все більшої уваги приділяється дослідженню даного процесу засобами математичного моделювання, оскільки це сприяє покращенню конструкцій обладнання, експлуатаційних витрат та може передбачити ефективність процесу в широкому діапазоні функціонування з мінімальними затратами на виробництво. Крім цього, відповідні дослідження дають підґрунтя для розробки автоматизованих систем керування процесами електрокоагуляції. Як і в більшості аналогічних випадків, процес отримання коагулянту електрокоагуляційним методом передбачає проведення складних і дороговартісних натурних експериментів із визначення вмісту корисного елементу (заліза) в коагулянті. Один із методів лабораторного визначення заліза в коагулянті є фотоколометричний метод. Розвиток технологій поглинання світла

обумовленою речовиною у видимій області спектра перетворюючи світлову енергію в енергію електричну, так звані технології фотоколометрії, дозволяють оцінити якісні показники багатокомпонентних сполук з більшою точністю та швидкістю. Крім того, відповідно до стандартизованих методів визначення вмісту заліза у воді відносять спосіб фотоколориметричного аналізу, адже при зміні концентрації заліза змінюється інтенсивність забарвлення досліджуваної води а також змінюється оптична густина середовища.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Більшість аспектів електрокоагуляційної очистки стічних вод недостатньо вивчені та продовжують удосконалюватися до тепер. Велика кількість авторів [1–3] приділяють свою увагу на дослідження таких параметрів як рН, температура, концентрацію забруднюючих речовин та не приділяючи часу на дослідження колірності отриманої речовини. Робота [2] розглядає основні принципи безперервної обробки води та розробку відповідних моделей, що зосереджуються на різних типах забруднювачів при ряді умов експлуатації. Дослідження [3] описує експерименти проведені для оцінки ефективності очищення води, що включає в себе вимірювання: помутніння, рН, провідність, температура та насиченість киснем. Робота [4] показує розробку моделі очистки стічних вод методом електрокоагуляції враховуючи оптимальні умови безперервної роботи системи при змінній густині струму. Автор [5] описує розподіл струму та потік рідини моделюючи їх як дифузійний процес проводячи натурні та комп'ютерні експерименти для перевірки адекватності моделі. Дослідження [6] наглядно демонструє процес електрокоагуляції та експерименти на працюючому устаткуванні очисних споруд. В свою чергу автори [7] досліджують ступінь і дисперсність забруднень, що утворюються на пластинах при різному часі електрокоагуляції та зміні полярності. Продовжує попереднє дослідження автор [8] та в своїй статті проводить наглядні експерименти демонструючи зміну осадів, що отримані шляхом електрокоагуляції на пластинах при змінному струмі та зображує осад отриманий при різному стані електроліту. В роботі [12] був виготовлений цифровий колориметр для визначення вмісту заліза з програмним додатком, що реєструє компоненти кольору, зберігаючи значення червоного, зеленого та синього кольорів, а також обчислюючи значення відтінку, насиченості, яскравості та сірого, використовуючи стандартну теорію кольорів, а в роботі [16] розроблений недорогий портативний пристрій для колориметричного аналізу на місцях. Автор [13] визначає концентрацію заліза в питних водах відповідно до нормативних зразків United States Environmental Protection Agency. Дослідження авторів [14] проводиться за допомогою веб-камери, що визначає вміст заліза в водах використовуючи цифрову колориметрію зображень. Основним методом даного дослідження є регресія найменших квадратів для отримання квадратного рівняння на основі червоного, зеленого та синього відтінків, насиченості та яскравості кольорів, що дозволило оцінити максимально точно аналіз що проводився. Робота [15] концентрується на порівнянні двох методів визначення концентрації хрому (Cr) та заліза (Fe), де перший метод заснований на простій лінійній регресії окремого кольору R, G або B, а другий метод сформований на теорії найменших квадратів усіх трьох кольорів R, G та B. Проте всі наведені роботи опираються на натурні експерименти, де концентрації корисного елементу визначаються лабораторним способом, що є затратно як матеріально так і з точки зору використаного часу.

Відповідно до сказаного, актуальною задачею є розробка автоматизованої системи електрохімічного отримання коагулянту на основі фотоколориметричного аналізу.

**Постановка задачі.** Для проектування експериментальної установки варто синтезувати математичну модель, що буде описувати процес електрокоагуляції для промислових стічних вод враховуючи зміну напруги і сили струму. Це в свою чергу дасть можливість порівняти результати теоретичних досліджень з експериментальними, а також дати оцінку відповідності розробленої моделі протікання процесів електрокоагуляції реальним даним. З огляду на те, що при зміні концентрації заліза у воді змінюється колір та інтенсивність забарвлення розчину експериментальну установку для лабораторних досліджень було вирішено доповнити цифровою підсистемою аналізу кольору та інтенсивності світлового потоку.

**Математична модель.** Для дослідження процесу електрокоагуляційної очистки рідини узагальнено розроблену в [9] математичну модель з урахуванням міркувань [10, 11]. Особливостями даної постановки є те, що вона враховує процеси, які проходять в реакторі та впливають на проходження процесу, як взаємодію різних факторів: концентрації завислих речовин у воді, прикладеної сили струму, швидкості потоку та температур рідини, зовнішнього середовища, води в реакторі, конструктивних параметрів коагулятора. Таким чином, для знаходження розподілів концентрації коагулянту  $C$  та температури  $T$  в електрокоагуляторі прийдемо до наступної модельної задачі:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = -v_c \nabla C + \nabla (D_c(T) \nabla C) + f_c(T)C + \Phi, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -v_T \nabla T + D_T \Delta T + \Psi, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} C(x, 0) &= C_0(x), \quad T(x, 0) = T_0(x), \\ C(0, t) &= C^0(t), \quad T(0, t) = T^0(t), \quad \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $D_T$  – коефіцієнти дифузії ( $\text{м}^2/\text{с}$ ),  $q_T$  – інтенсивність внутрішніх джерел теплоти,  $v_c$  – швидкість поширення коагулянту ( $\text{м}/\text{с}$ ),  $v_T$  – швидкість поширення температури ( $\text{м}/\text{с}$ ),  $c_T$  – теплоємність ( $\text{Дж}/\text{кг}$ ),  $\rho$  – густина ( $\text{кг}/\text{м}^3$ )  $L$  – довжина коагулятора ( $\text{м}$ ),  $H$  – висота коагулятора ( $\text{м}$ ),  $B$  – ширина коагулятора ( $\text{м}$ ).

Під час електрокоагуляції відбувається нагрівання розчину електроліту. Кількість теплоти  $\Psi = \frac{q_T}{c_T \rho}$ , яка при цьому виділяється, пропорційна величині струму, часу його проходження і падінню напруги  $q_T = I \cdot U \cdot t$ ,  $U$  – прикладена напруга ( $\text{В}$ ),  $I$  – величина струму ( $\text{А}$ ),  $f_c(T) = \eta \frac{3R_g T I}{8F d_b A_s P}$  – функція, яка враховує флотаційну складову процесу,  $R_g$  – газова константа ( $\text{Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ ),  $d_b$  – діаметр бульбашок ( $\text{м}$ ),  $P$  – це атмосферний тиск ( $\text{Па}$ ),  $A_s$  – площа поперечного перерізу камери ( $\text{м}^2$ ) та  $\eta$  – ефективність накопичення однією бульбашкою – визначається як частка забруднюючої речовини на шляху бульбашки, які фактично налипають на бульбашку. Дифузійний рух частинок в рідині можна розглядати як рух з тертям, до нього може бути застосовано друге співвідношення Ейнштейна:  $D_c(T) = U_c k T$ . Тут  $k$  – стала Больцмана ( $\text{Дж}/\text{К}$ ),  $U_c$  – рухливість дифундуючих частинок, тобто коефіцієнт пропорційності між швидкістю частинки і рушійною силою ( $\text{Па}\cdot\text{с}\cdot\text{м}$ ). Якщо частки сферично симетричні, то  $U_c = 1/(6\pi h r)$ , де  $h$  – коефіцієнт в'язкості рідини,  $r$  – радіус частинки. В [10] також запропоновано числові вирази для розрахунку  $\eta$ .  $\Phi = \frac{I t}{V_A n F} + k_h S_k t$  – функція що відповідає за електрохімічну реакцію, тут  $V_A$  – об'єм апарата ( $\text{м}^3$ ),  $n$  – кількість електронів реакції,  $F$  – стала Фарадея ( $\text{Кл}/\text{моль}$ ),  $k_h$  – константа швидкості гетерогенної реакції ( $\text{моль}/\text{м}^2\cdot\text{с}$ ),  $S_k$  – площа катода ( $\text{м}^2$ ).

Для дослідження модельної задачі (1)-(2) використаємо додаток `pdere` програмного середовища Matlab, який дає можливість знаходити розв'язок рівнянь параболічного та еліптичного типів, досліджувати вплив параметрів в даних системах.

Для отримання розв'язку на основі додатку `pdere` необхідно розробити 4 файли, які описують: задану систему рівнянь (`pdex2pde.m`), початкові умови (`pdex2ic.m`), граничні умови (`pdex2bc.m`) та головну функцію (`main.m`).

У файлі `pdex2pde.m` спочатку необхідно перетворити систему рівнянь (1) в машинний код:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = -v_c \nabla C + \nabla(D_c(T) \nabla C) + f_c(T)C + \Phi, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -v_T \nabla T + D_T \Delta T + \Psi, \end{cases}$$

$$\Downarrow$$

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \cdot \frac{\partial u}{\partial t} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left( x^m f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \right) + s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right),$$

Вміст `m`-файлу `coagul_pdex2pde.m` представлено на рис. 1.

```
function [c, f, s] = coagul_pdex2pde (X, t, u, DuDx)
n=0.8; Rg=8.31; I=70;
F=96500; db=1.5*10^-6; As=15; p=101325;
a=0.00012; Lm=0.39*10; L=0.4; U=24; qv=1; c=3310; po=1060;

Vl=0;
Dl=10^-9;

c1=1; c2=1/a; f1=Dl*DxDx{1}-Vl*u{1}; f2=Lm/L*DxDx{2};

s1=(n*3*Rg*u{2}*I/(6*F*db*As*P)/2.9/(10^-2*(t+1)))*u{1};
s2=I*U*exp{8.8/(0.01*t+1)}/(c*po*a);
c = [c1; c2];
f = [f1; f2];
s = [s1; s2];
end
```

Рис. 1. Скріншот програмного коду файлу `coagul_pdex2pde.m`

Початкові умови:

$$\begin{cases} C_0(x, t_0) = 0.1, \\ T_0(x, t_0) = 20. \end{cases} \Leftrightarrow u(x, t_0) = u_0(x).$$

Вміст m-файлу *coagul\_pdex2ic.m* представлено на рис. 2.

```
function u0 = coagul_pdex2ic(x)
    u10=0.1;
    u20=20;
    u0 = [u10;u20];
end
```

Рис. 2. Скріншот програмного коду файлу *coagul\_pdex2ic.m*

Граничні умови:

$$\begin{cases} \frac{\partial C^0(x_L,t)}{\partial x} = 0, & \frac{\partial C^0(x_R,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial T^0(x_L,t)}{\partial x} = 0, & \frac{\partial T^0(x_R,t)}{\partial x} = 0. \end{cases} \Leftrightarrow p(x,t,u) + q(x,t) \cdot f(x,t,u, \frac{\partial u}{\partial x}) = 0.$$

Вміст m-файлу *coagul\_pdex2bc.m* представлено на рис. 3.

```
function [p1,q1,pr,qr] = coagul_pdex2bc(xl,ul,xr,ur,t)
    p1=[0;0];
    q1=[1;1];
    pr=[0;0];
    qr=[1;1];
end
```

Рис. 3. Скріншот програмного коду файлу *coagul\_pdex2bc.m*

Для опису головної функції *pdepe* використаємо m-файл *coagul\_pdepe.m*, який представлено на рис. 4.

```
m=0;
x=linspace(0,0.6,101);
t=linspace(0,250,101);

sol = pdepe(m, @coagul_pde2pde, @coagul_pdex2ic, @coagul_pdex2bc, x, t);
u1 = sol(:,1);
u2 = sol(:,2);
```

Рис. 4. Скріншот програмного коду файлу *coagul\_main.m*

Результати моделювання за вхідних даних:  $\nu = 0.12$  м/с;  $\eta = 0.8$ ;  $R_g = 8.31$ , Дж/(моль · К);  $F = 9.65 \cdot 10^4$ , Кл/моль;  $A_s = 15$ , м<sup>2</sup>;  $d_b = 1.5 \cdot 10^{-6}$ , м;  $U = 24$ , В;  $a = 0.12 \cdot 10^{-3}$ , м<sup>2</sup>/с;  $\lambda_m = 0.39$ , Вт/м · с;  $a_2 = 880$ ;  $\lambda = 0.4$ , Вт/м · с;  $c = 3.31 \cdot 10^3$ , Дж/кг;  $\zeta = 1060$ , кг/м<sup>3</sup>;  $a_1 = 290$ ;  $D = 10^{-9}$ , м<sup>2</sup>/с, представлено на рис. 5.

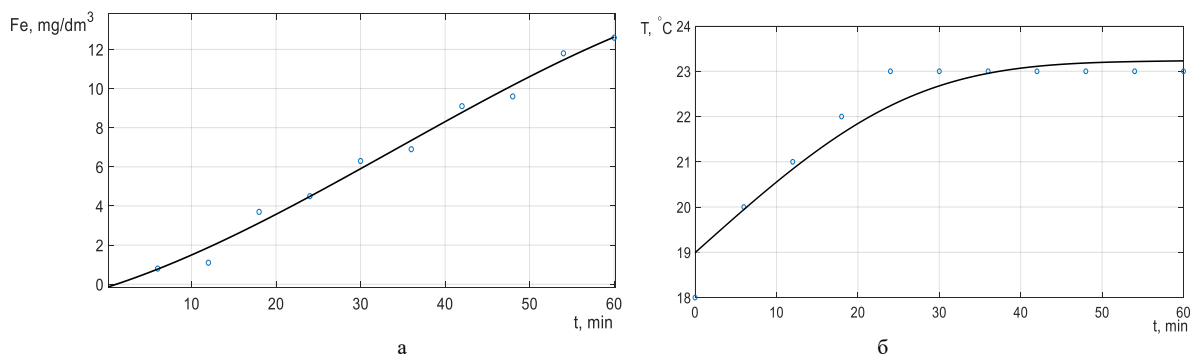


Рис. 5. Розподіл:

а) концентрації тривалентного заліза з часом на виході з коагулятора; б) температури води з часом

Для дослідження впливу величини струму на концентрацію тривалентного заліза використовуємо результати комп'ютерного моделювання на основі задачі (1)–(2). При цьому всі параметри моделі такі як: величина прикладеної напруги, конструктивні розміри реактора, характеристики води, час моделювання залишили сталими. Міняючи величину струму отримали різні результати зміни температури води та концентрації тривалентного заліза. Отримані результати представлено на рис. 6.

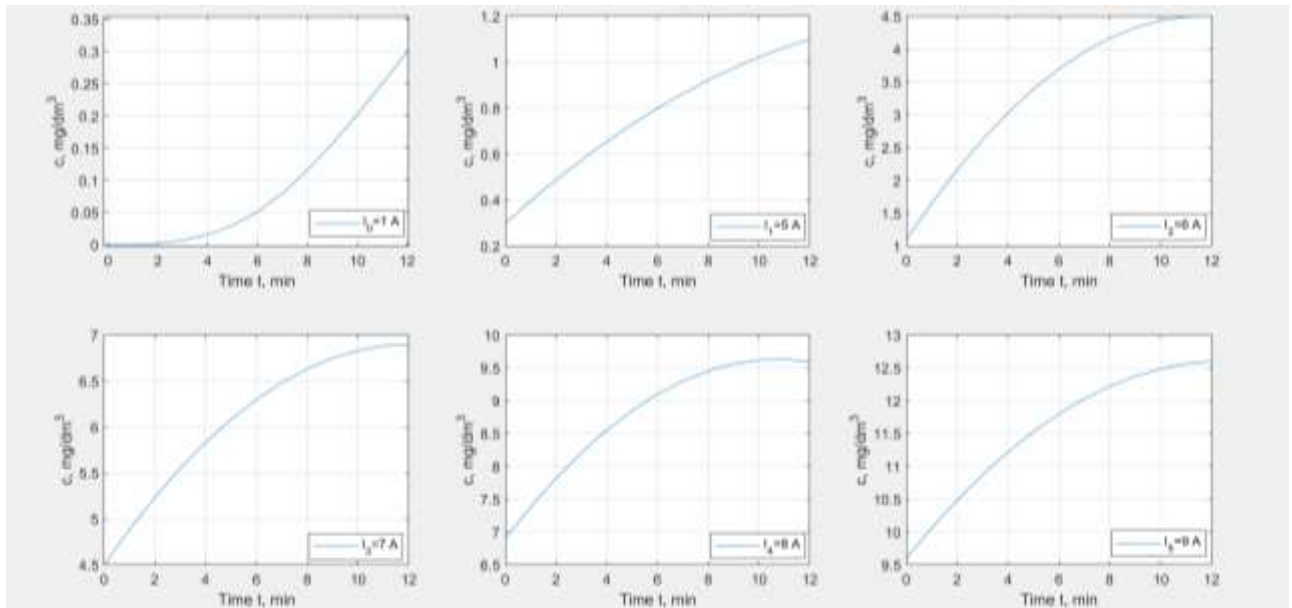


Рис. 6. Зміна концентрації заліза на виході з коагулятора з часом при величині струму  $I_0=1$  А,  $I_1=5$  А,  $I_2=6$  А,  $I_3=7$  А,  $I_4=8$  А,  $I_5=9$  А

**Проектування лабораторної установки.** Відповідно до поставленої мети, була розроблена структура лабораторної установки для дослідження процесів електрокоагуляції (рис. 7):

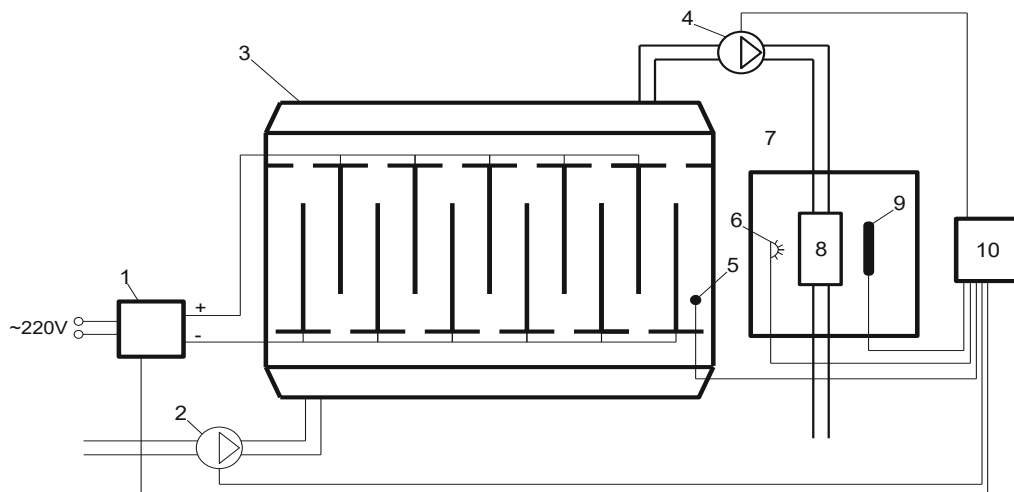


Рис. 7. Структура лабораторної установки автоматизованої системи електрохімічного отримання коагулянту на основі фотоколориметричного аналізу

Відповідно до розробленої структури лабораторної установки, електрокоагулятор (3) є проточного типу і являє собою ємність зі діелектричного матеріалу з металевими пластинами всередині, по чергової різної полярності, що утворюють катода та анода. Живлення електрокоагулятора забезпечується лабораторним блоком живлення (1). Вода подається за допомогою насоса (2), рівномірно розподіляється між камерами коагулятора та відводиться за допомогою насоса (4) до вимірювальної комірки (7). При цьому температура досліджуваного середовища контролюється за допомогою електронного термометра (5), що дублюється з лабораторним ртутним. Вимірювальна комірка складається із проточної прозорої вимірювальної ємності (8), джерела світла (6) та чутливого елемента (9). Вимірювальна інформація, а також сигнали управління комутують у блоці управління та реєстрації (10).

Розроблена лабораторна установка дозволила провести експериментальні дослідження для перевірки адекватності побудованої математичної моделі, а також отримати додаткові дані щодо зміни забарвлення води від концентрації заліза. Згідно плану експерименту, дослідження тривали 60 хвилин, при цьому кожні 6 хвилин здійснювалася фіксація показників сили струму живлення коагулятора, температура та інтенсивність складової кольору червоного, зеленого та синього світла. Таким чином було відібрано 10 проб розчину заліза у воді для лабораторного визначення концентрації стандартизованими методами.

В таблиці 1 наведені результати експериментального дослідження процесу, а саме: визначення концентрації загального та трьох валентного заліза, сили струму та колірності речовини в різні моменти часу та зі зміною напруги.

Таблиця 1

Результати експериментального дослідження

Номер проби	Час, хв	Напруга, В	Сила струму, А	Колірність			Температура, °С	Концентрація, мг/дм <sup>3</sup>	
				R	G	B		Загальне залізо	Fe <sup>3+</sup>
1	6	5	0,8	204	207	200	20	0,8	0,33
2	12	5	0,85	214	215	193	22	1,1	0,4
3	18	6	1,3	211	194	75	23	3,7	2,9
4	24	6	1,3	220	173	54	23	4,5	3,1
5	30	7	1,65	210	155	49	23	6,3	5,4
6	36	7	1,65	215	147	41	23	6,9	5,8
7	42	8	1,9	193	116	38	23	9,1	7,1
8	48	8	1,9	189	111	33	23	9,6	7,6
9	54	9	2,05	188	100	27	23	11,8	8,9
10	60	9	2,1	178	74	11	23	12,6	9,6

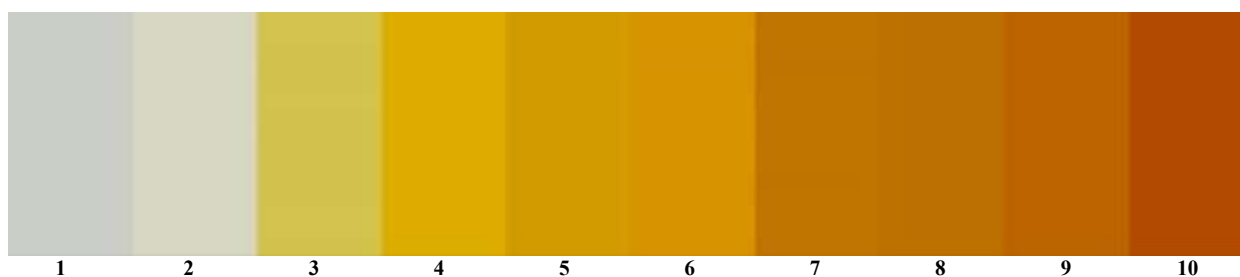


Рис. 8. Зміна кольору речовини при зміні напруги

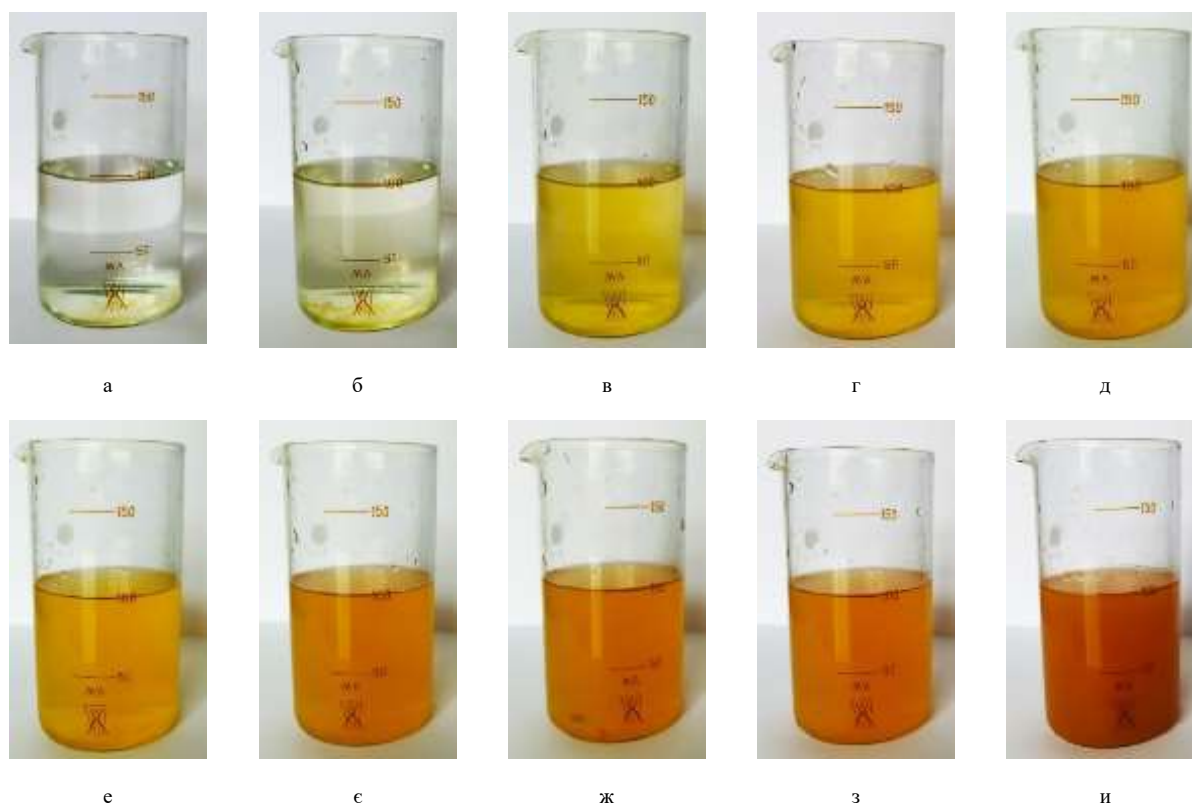


Рис. 9. Колір води RGB при змінній концентрації та часу дослідження :

- а) RGB (204;207;200),  $c=0,8$  мг/л,  $t=6$  хв; б) RGB (214;215;193),  $c=1,1$  мг/л,  $t=12$  хв;  
в) RGB (211;194;75),  $c=3,7$  мг/л,  $t=18$  хв; г) RGB (220;173;54),  $c=4,5$  мг/л,  $t=24$  хв;  
д) RGB (210;155;49),  $c=6,3$  мг/л,  $t=30$  хв; е) RGB (215;147;41),  $c=6,9$  мг/л,  $t=36$  хв;  
є) RGB (193;116;38),  $c=9,1$  мг/л,  $t=42$  хв; ж) RGB (189;111;33),  $c=9,6$  мг/л,  $t=48$  хв;  
з) RGB (188;100;27),  $c=11,8$  мг/л,  $t=54$  хв; и) RGB (178;74;11),  $c=12,6$  мг/л,  $t=60$  хв;



Експериментальне дослідження проводилося протягом 60 хв, з результатів експерименту бачимо, що при збільшенні напруги від 5 В до 9 В – збільшується сила струму від 0.8 А до 2.1 А відповідно результатам таблиці 1 та змінюється колірність вихідної речовини згідно Рис. 8. Тобто при найменшій напрузі можемо спостерігати найсвітлішу та майже прозору воду, а при найвищому показнику напруги мутну і руду воду.

В ході дослідження було відібрано 10 проб, що продемонстровані на рис. 9 та на базі яких проведено на приладі КФК2-МП визначення загального заліза і трьох валентного  $\text{Fe}^{3+}$ .

В ході опрацювання результатів побудовано графічні залежності RGB-складових кольору води та відповідної концентрації загального заліза (рис. 10) і  $\text{Fe}^{3+}$  у воді (рис. 11).

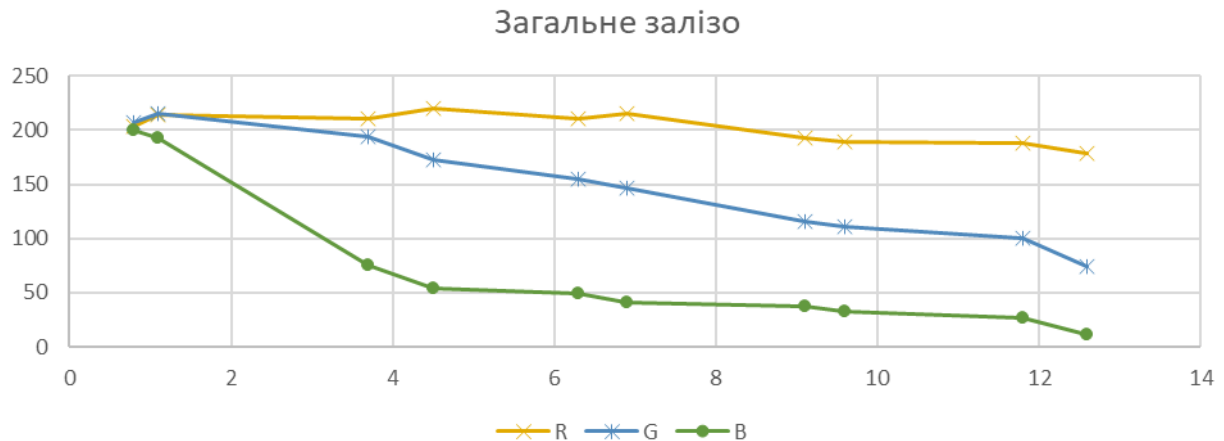


Рис. 10. Залежність концентрації загального заліза від RGB-складових кольору води

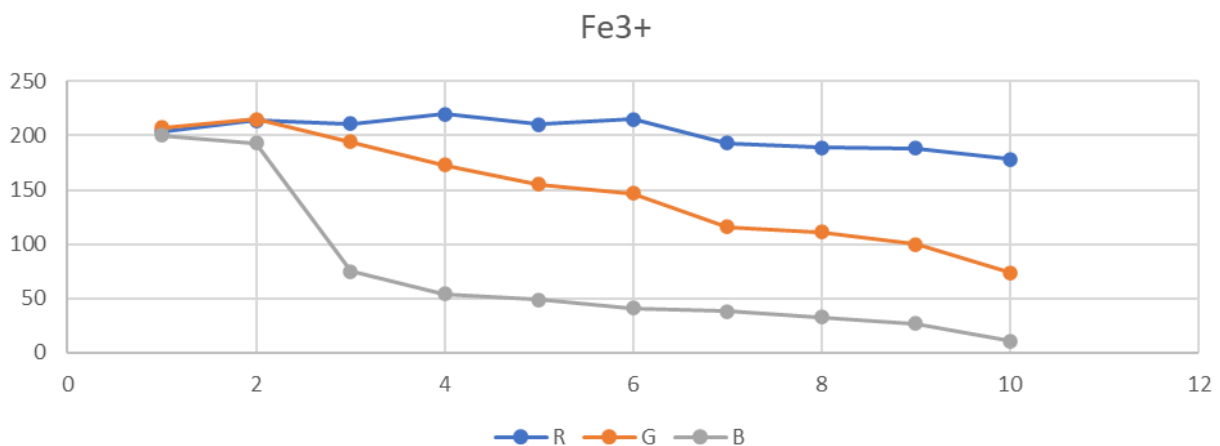


Рис. 11. Залежність концентрації  $\text{Fe}^{3+}$  від RGB-складових кольору води

Аналізуючи графіки залежностей складових кольору від концентрації можна зробити висновок про стійкі кореляційні взаємозв'язки між цими параметрами. Таким чином, це дає можливість для розробки нових експрес-методів, в тому числі інтелектуальних, для оцінки концентрації заліза у воді в реальному режимі часу, без необхідності відбору проб, а також в подальшому інтегрувати такі методи у системи керування процесами електрокоагуляції.

**Висновки.** Узагальнено математичну модель отримання коагулянту, яка дозволяє визначити необхідні умови, а саме: кількість пластин, розміри реактора, величина прикладеної напруги і т.д. для отримання заданої концентрації іонів заліза. За допомогою *m*-функції *pdepe* програмного середовища *Matlab* проведено моделювання системи отримання коагулянту. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації іонів заліза, температури водного середовища при різній величині струму між катодом і анодом. Розроблено лабораторну установку визначення залізовмісного коагулянту на основі фотоколориметричного аналізу, що складається з проточної непрозорої комірки через яку з сталою витратою пропускається досліджувана рідина, а також блоком оброблення та збереження інформації, що дозволяє знизити участь людини в процесі вимірювань і забезпечити безперервність процесу вимірювань через відсутність потреби у відборі проби досліджуваного матеріалу, а також зменшити трудомісткість процесу вимірювань.

## Reference

1. Posavčić H., Halkijević I., Vuković Ž. Application of electrocoagulation for water conditioning. *Environmental Engineering*, 2019, 6(2) pp. 59-70. doi: 10.37023/ee.6.2.3.
2. Yasri N., Hu J., Kibria Md. G., Roberts P. L. E. Electrocoagulation Separation Processes. *Multidisciplinary Advances in Efficient Separation Processes*, 2020, Chapter 6, pp. 167-203. doi:10.1021/bk-2020-1348.ch006.
3. Forero G., Hernández-Lara R., Rojas O. Development of an electrocoagulation equipment for wall paint wastewater treatment. *Ingeniería y Competitividad*, 2020, 22(2). pp. 1-10. doi: 10.25100/iyv.22i2.9474.
4. Rahman A. N., Kumar N. K. M. F., Gilan U. J., Jihed E. E., Philip A., Linus A. A., Shahin N. D., Ismail V. Kinetic Study & Statistical Modelling of Sarawak Peat Water Electrocoagulation System using Copper and Aluminium Electrodes. *Journal of Applied Science & Process Engineering*, 2020, 7(1). pp. 439 - 456. doi: 10.33736/jaspe.2195.2020.
5. Saeed H. Al-Barakat, Matloub F. K., Ajjam S. Kath., Tahseen A. Al-Hattab. Modeling and Simulation of Wastewater Electrocoagulation Reactor. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, 2020. Volume 871. doi: 10.1088/1757-899X/871/1/012002.
6. Koyuncu S., Ariman S. Domestic wastewater treatment by real-scale electrocoagulation process. *Water Sci Technol*. 2020, 81 (4). pp. 656–667. doi: 10.2166/wst.2020.128.
7. Yasri N., Arumugam A., Kalpana M., Shu T., Fuladpanjeh B., Oldenburg T., Trifkovic M., Mayer B., Roberts P.L. E. Electrocoagulation for the treatment of Produced Water. *University of Calry. Alberta Innovates*, 2017.
8. Govindan K., Arumugam A., Kalpana M., Rangarajanb M., Shankare P., Jang A. Electrocoagulants characteristics and application of electrocoagulation for micropollutant removal and transformation mechanism. 2019. DOI: 10.1021/acsami.9b16559.
9. Bomba A., Safonyk A. Mathematical modeling of aerobic wastewater treatment in porous medium. *Zeszyty Naukowe WS*, 2013. Vol. 12, No 1, pp. 21–29.
10. Bomba A., Klymiuk Yu., Prysiazhniuk I., Prysiazhniuk O., Safonyk A. Mathematical Modeling of Wastewater Treatment from Multicomponent Pollution by Using Microporous Particles. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1773, pp. 1–11.
11. Kaur R., Amit A. Treatment of waste water through electrocoagulation. *Pollution Research*, 2018, Vol. 37, Issue 2, pp. 394–403.
12. Masawat P., Harfield A., Srihirun N., Namwong A. Green Determination of Total Iron in Water by Digital Image Colorimetry. *Analytical Letters*, 2016, 50(1), pp. 173–185. doi: 10.1080/00032719.2016.1174869.
13. Sreenivasareddy A. Determination of Iron Content in Water. *Governors State University OPUS Open Portal to University Scholarship*, 2017.
14. Barros J. A. V. A., Moreira F., Santos G., Wisniewski C., Luccas P. O. Digital Image Analysis for the Colorimetric Determination of Aluminum, Total Iron, Nitrite and Soluble Phosphorus in Waters. *Analytical Letters*, 2016, pp. 414-430. doi: 10.1080/00032719.2016.1182542.
15. Firdaus M., Alwib W., Trinoveldib F., Rahayuc I., Rahmidard L., Warsitoa K. Determination of Chromium and Iron Using Digital Image-based Colorimetry. *Procedia Environmental Sciences*, 2014, Vol 20, pp. 298 – 304. doi: 10.1016/j.proenv.2014.03.037.
16. Luka G. S., Nowak E., Kawchuk J., Hoorfar M., Najjaran H. Portable device for the detection of colorimetric assays, 2017. doi: 10.1098/rsos.171025.