

УДК 631.67:621.647.2:621.643:621.67

¹Ф.І. Гончаров, к.т.н., доц.
²В.М. Штепа, к.т.н., старш. викл.

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЛІЗНИХ ПРОЦЕСІВ СИСТЕМИ БЕЗПЕЧНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Національний університет біоресурсів і природокористування України

¹E-mail: fgfi@bigmir.net

²E-mail: shns-4@bigmir.net

Із використанням рівнянь матеріального та теплового балансів створено динамічну модель електролізних процесів системи безпечного водопостачання агропромислових об'єктів. Підтверджено адекватність моделі, що дозволить проводити статистичні дослідження електротехнологічної очистки.

безпечне водопостачання, водоочистка, електроліз, моделювання

Вступ

Системи водоочищення, які комплексно об'єднують біофізико-хімічні методи, зазвичай ефективно працюють на виробництві нетривалих термін [1].

Потім через багатокомпонентність та неузгодженість технологічних процесів вони перестають забезпечувати вимоги до якості, енерго- та ресурсоефективності.

Часто таке відбувається на тих промислових об'єктах, де значно перевищуються щодо стічних вод нормативні вимоги до концентрації органіки та завислих частинок, агресивності водного середовища [2].

Серед багатьох чинників, які спричиняють такий негативний результат, варто виокремити передусім такі [2]:

– недостатність повноти інформації про конкретний комплексний процес водопідготовки, складність його адекватного дослідження;

– багатофакторність біофізико-хімічних характеристик процесів, що може спричинити утворення нових невідомих забруднювачів;

– брак або низькі точність та швидкодія сучасних засобів автоматичних вимірювань складу води (існують датчики температури, тиску, каламутності, витрат, рН, ОВП, БПК, ХПК, вмісту хлора, іонного складу).

Створення адекватних динамічних математичних моделей навіть окремих технологічних процесів водоочищення дозволяє підвищити ефективність функціонування комплексних систем водоочищення, зменшуючи тим самим час та фінансові затрати на лабораторно-виробничі дослідження.

Аналіз досліджень і публікацій

Експериментальні дослідження електролізних процесів не лише на виробництві, але й у лабораторних умовах, потребують значних затрат фінансів та часу [3].

Установлено, що математичну модель потрібно розроблювати на конкретну водоочисну установку, оскільки розбіжності розмірів, матеріалу вузлів і технологічні характеристики навіть споріднених розробок призводять до неадекватності моделей [4].

Постановка завдання – створення адекватної аналітичної математичної моделі електролізних процесів системи безпечного водопостачання промислових об'єктів [5].

Динамічна модель електролізу водних розчинів системою безпечного водопостачання

Із виробничих міркувань, для побудови математичної моделі електролізера як вихідні використано технологічні параметри, для вимірювання яких застосовують промислові сприймальні елементи:

- силу струму;
- температуру;
- концентрацію завислих частинок;
- швидкість потоку.

Спочатку запишемо закони збереження маси та енергії у вигляді диференціальних балансових рівнянь.

Матеріальний баланс можна подати у вигляді рівняння, що характеризується зміною концентрації завислих частинок у процесі реакції (електролізу) за часом, зумовленої рухом колоїдної речовини, змішуванням та коагуляцією [4]:

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{L}{V_k} (C_{ex} - C) - \omega_k \quad (1)$$

Початкові умови:

$$\tau = 0;$$

$$\frac{dC}{d\tau} = 0;$$

$$C = C_0,$$

де C – концентрація цільового компонента у розчині, г/м³;

C_{ex} – концентрація речовини на вході в електролізер, г/м³;

V – об'єм робочої зони електролізера, м³;

L – об'ємні витрати рідини, м³/с;

ω_k – швидкість коагуляції, г/(м³·с).

Від'ємний знак перед другим членом правої частини рівняння (1) вказує, що значення залежних частинок, які видаляються із стічної води, зменшується.

Для визначення розподілу концентрації за координатою в напрямку руху рідини застосуємо модель ідеального витіснення [4].

Швидкість простої реакції електрокоагуляції відповідає закону діючих мас [3]:

$$\omega = k C^n, \quad (2)$$

де k – константа швидкості реакції;

n – експериментальна стала.

Залежність швидкості реакції від температури можна описати з використанням закону Арреніуса [3]:

$$K = k_0 e^{-E/RT}, \quad (3)$$

де k_0 – підекспоненційний множник;

E – енергія активації, Дж;

R – універсальна газова стала;

T – абсолютна температура, К.

Для отримання рівняння теплового балансу електролізера ідеального змінювання проточного типу прирівнюємо швидкість змінення ентальпії рідини (стічних вод птахофабрики) та різницю підходу та витрат теплоти за одиницю часу:

$$Q_k = Q_E - (Q_{втр} + Q_{від}), \quad (4)$$

де Q_k – теплота, виділена на підвищення температури середовища, Дж;

Q_E – кількість теплоти, виділеної під час екзотермічної реакції, Дж;

$$Q_E = \omega V_k H, \quad (5)$$

H – тепловий ефект процесу (реакції електрокоагуляції), Дж/г·с.

$Q_{втр}$ – кількість теплоти, що передається в оточуюче середовище, Дж:

$$Q_{втр} = kS(t - t_3), \quad (6)$$

k – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м²·°С;

S – поверхня робочої зони апарата, м²;

t – температура рідини, °С;

t_3 – температура зовнішнього середовища, °С.

$Q_{від}$ – кількість теплоти, що відводиться з потоком очищеної води та коагулянту, Дж:

$$Q_{від} = c\rho L(t - t_{вх}) \quad (7)$$

c – питома теплоємність рідини, Дж/°С;

ρ – густина рідини, кг/м³.

Підставляючи складові рівнянь (5)–(7) у залежність (3), отримаємо:

$$c\rho V_k \frac{dt}{d\tau} = \omega V_k H - kS(t - t_3) - c\rho L(t - t_{вх}). \quad (8)$$

Початкові умови:

$$\tau = 0;$$

$$\frac{dt}{d\tau} = 0;$$

$$t = t_0.$$

Швидкість реакції є функцією температури і концентрації $\omega_k(C, t)$, яку отримуємо зі співвідношень (3) та (4):

$$\omega_k = k_0 C e^{-E/RT}, \quad (9)$$

що не враховує в явному вигляді величину електричного струму, зміна якого ΔI є керувальним впливом на процес електролізу стічних вод агропромислових підприємств.

Тому залежність (9) апроксимуємо лінійною функцією

$$\omega_k = f(T, C, I).$$

Її можна отримати з експериментальних даних на систему безпеки водопостачання (матеріал електродів – сталь марки Ст. 3) [6], тобто:

$$\omega_k = a_0 + a_1 t + a_2 C + a_3 I, \quad (10)$$

де $a_0 - a_3$ – емпіричні коефіцієнти;

t – температура води, $^{\circ}\text{C}$;

C – концентрація завислих частинок, $\text{г}/\text{м}^3$;

I – сила струму, А .

Таким чином, з урахуванням рівняння (10) маємо систему рівнянь, що описують динаміку процесу електролізу в проточному апараті ідеального змішування:

$$\begin{cases} \frac{dC}{d\tau} = \frac{L}{V_k} (C_{\text{ex}} - C) - (a_0 + a_1 t + a_2 C + a_3 I); \\ T_2 \frac{dt}{d\tau} = \frac{(a_0 + a_1 t + a_2 C + a_3 I) V_k H}{KS} - (t - t_3) - \frac{c\rho L(t - t_{\text{ex}})}{KS}. \end{cases} \quad (11)$$

Початкові умови:

$$\tau = 0;$$

$$\frac{dC}{d\tau} = 0;$$

$$C = C_0;$$

$$\frac{dt}{d\tau} = 0;$$

$$t = t_0,$$

де T_2 – стала часу розігріву:

$$T_2 = \frac{c\rho V_k}{KS}.$$

Розкривши дужки, виконавши групування та заміни із рівняння (11) дістаємо:

$$\begin{cases} T_1 \frac{dC}{d\tau} = A_1 - B_1 C - D_1 t; \\ T_2 \frac{dt}{d\tau} = A_2 + B_2 C + D_2 t, \end{cases} \quad (12)$$

де

$$T_1 = \frac{V_k}{L};$$

$$A_1 = C_{\text{ex}} - \frac{a_0 V_k}{L} - \frac{a_3 I V_k}{L};$$

$$B_1 = 1 + \frac{a_2 V_k}{L};$$

$$D_1 = \frac{a_1 V_k}{L};$$

$$A_2 = \frac{a_3 I V_k H}{KS} + t_3 + \frac{c\rho L t_{\text{ex}}}{KS} + \frac{a_0 V_k H}{KS};$$

$$B_2 = \frac{a_2 V_k H}{KS};$$

$$D_2 = \frac{a_1 V_k H}{KS} - \frac{c\rho L}{KS} - 1.$$

Початкові умови:

$$\tau = 0;$$

$$\frac{dC}{d\tau} = 0;$$

$$C = C_0;$$

$$\frac{dt}{d\tau} = 0;$$

$$t = t_0.$$

Із першого рівняння системи (12) визначимо t та

$\frac{dt}{d\tau}$ і підставимо у друге рівняння цієї ж системи:

$$t = \frac{A_1}{D_1} - \frac{B_1}{D_1} C - \frac{T_1}{D_1} \frac{dC}{d\tau};$$

$$\frac{dt}{d\tau} = -\frac{B_1}{D_1} \frac{dC}{d\tau} - \frac{T_1}{D_1} \frac{d^2 C}{d\tau^2};$$

$$-\frac{T_1 T_2}{D_1} \frac{d^2 C}{d\tau^2} - \left(\frac{T_2 B_1}{D_1} + \frac{T_1 D_2}{D_1} \right) \frac{dC}{d\tau} +$$

$$+ (B_2 + \frac{D_2 B_1}{D_1}) C = -\frac{D_2 A_1}{D_1} - A_2.$$

Використавши заміни, отримаємо початкові умови:

$$\tau = 0;$$

$$C = C_0;$$

$$\frac{dC}{d\tau} = \frac{A_1}{T_1} - \frac{B_1}{T_1} \cdot C_0 - \frac{D_1 \cdot t_0}{T_1};$$

$$A' \frac{d^2 C}{d\tau^2} - B' \frac{dC}{d\tau} + C' C = D'. \quad (13)$$

У характеристичному рівнянні:

$$A' \frac{d^2 C}{d\tau^2} - B' \frac{dC}{d\tau} + C' C = 0; \quad (14)$$

Таблиця 2

$$A' = \frac{T_1 T_2}{D_1};$$

$$B' = \frac{T_2 B_1}{D_1} - \frac{T_1 D_2}{D_1};$$

$$C' = B_2 + \frac{D_2 B_1}{D_1};$$

$$D' = -\frac{D_2 A_1}{D_1} - A_2.$$

Корені характеристичного рівняння:

$$\lambda_{1,2} = \frac{B' \pm \sqrt{(B')^2 - 4A'C'}}{2A}. \quad (15)$$

Система рівнянь для знаходження незалежних сталих C'_1 та C'_2 має вигляд:

$$\begin{cases} C_o = C'_1 + C'_2 + \frac{D'}{C'}; \\ \frac{A_1}{T_1} - \frac{B_1}{T_1} \cdot C_o - \frac{D_1 \cdot t_o}{T_1} = \lambda_1 C'_1 + \lambda_2 C'_2. \end{cases}$$

Розв'язання рівняння (15) таке:

$$C'_1 = C_o - \frac{D'}{C'} - \left[\left(\frac{A_1}{T_1} - \frac{B_1 C_o}{T_1} - \frac{D_1 t_o}{T_1} + \frac{D' \lambda_1}{C'} - C_o \lambda_1 \right) \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \right];$$

$$C'_2 = \left(\frac{A_1}{T_1} - \frac{B_1 C_o}{T_1} - \frac{D_1 t_o}{T_1} + \frac{D' \lambda_1}{C'} - C_o \lambda_1 \right) \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1}.$$

Загальний розв'язок рівняння (13) матиме вигляд:

$$C(\tau) = C'_1 e^{\lambda_1 \tau} + C'_2 e^{\lambda_2 \tau} + \frac{D'}{C'}. \quad (16)$$

Коефіцієнти лінійного рівняння регресії (10) знаходимо за методами математичної статистики (табл. 1, де рівень імовірності становить 0,95, коефіцієнт множинної кореляції – 0,92, стандартне відхилення оцінки – 1,23 мг/л) та експериментальними даними (табл. 2) [5].

Таблиця 1

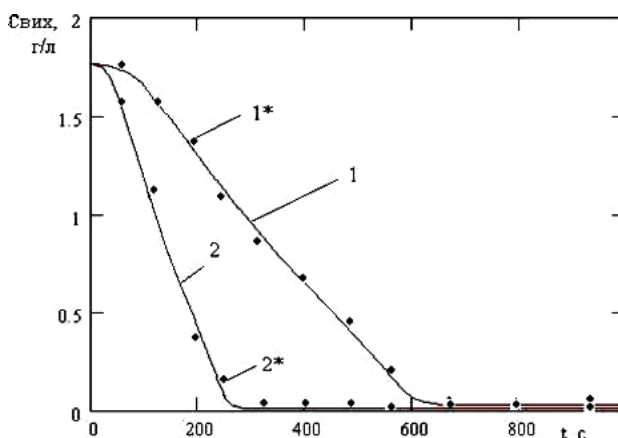
Коефіцієнти лінійного рівняння регресії

Y	ω	0,772
x1	I	2,394
x2	C	0,716
x3	t	-0,002

Експериментальні дослідження залежності вихідної концентрації від збурення за температурою, вхідною концентрацією, силою струму

I, A	C, мг/л	t, °C	ω
0,12	246,6	20	177,4
0,29	369,475	28,7	265,8
0,46	491,95	32,1	353,9
0,63	613,975	35,1	441,7
0,8	736,2	37	529,6
0,97	875	39,2	629,5
1,14	1000	41,3	719,4
1,31	1125	43	809,3
1,48	1250	44,2	899,3

Для перевірки адекватності виразу (16) реального об'єкта провели експериментальні дослідження: варіювали силу струму, вхідну концентрацію завислих частинок та температуру води (див. рисунок).



Приклад експериментальних та теоретичних досліджень електролізера: (I = 0,75 А, C_{вх} = 3 г/л, t = 25 °С); 1, 2 – теоретичні криві розгону; 1*, 2* – експериментальна криві розгону

Під час розрахунків усі корені рівняння (14) були дійсними та різними числами.

Із використанням аналітичних та експериментальних матеріалів розраховували відносну стандартну середньоквадратичну похибку (див. рисунок):

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m (y_T - y_e)^2} \cdot 100 = 1,4\%, \quad (17)$$

де m – кількість точок порівняння;

y_T, y_e – відповідно теоретичні та експериментальні значення досліджуваної величини.

Аналіз експериментальних та теоретичних досліджень електролізера та похибки [див. формулу (17)], показав, що експериментальні та теоретичні криві розгону виходять на сталі значення, збігаються за формою (*S*-подібні), а похибка науково достатня.

Висновки

Математична модель електролізних процесів, яка розроблена у вигляді системи двох диференціальних рівнянь, описує динаміку електролізу в проточному апараті ідеального змішування, адекватна (відносна стандартна середньоквадратична похибка 1,4%). Її можна використовувати для теоретичних досліджень системи безпечного водопостачання агропромислових об'єктів.

Література

1. Назарян М.М. Электрокоагуляторы для очистки промышленных стоков / М.М. Назарян, В.Т. Ефимов.– Х.: Вища шк., 1983. – 144 с.

2. Штепа В.М. Аналітичне моделювання як об'єкта керування резервуара для змішування стічних вод птахофабрики та гіпохлоритних розчинів, отриманих електролізом / В.М. Штепа // Науковий вісник Національного аграрного університету. – 2007. – Вип. 115. – С.109-112.

3. Бондарь А.Г. Математическое моделирование в химической технологии /А.Г. Бондар. – К.: Вища шк., 1973. – 280 с.

4. Липатов Л.Н. Типовые процессы химической технологии как объекты управления / Л.Н. Липатов. – Л.: Химия, 1983. – 320 с.

5. Гончаров Ф.І. Энерго- та ресурсозберігаюча схема системи водопостачання населених пунктів / Ф.І. Гончаров, В.М. Штепа // Наукові нотатки Луцького національного технічного університету. – Луцьк: ЛНТУ, 2009. – С. 49–54.

6. Пат. України № 22010. Автоматична насосна станція / Ф.І. Гончаров. – К.: Державне патентне відомство, 1998. – 4 с.

Стаття надійшла до редакції 29.01.10.

Ф.И. Гончаров, В.Н. Штепа

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

безопасное водоснабжение, водоочистка, моделирование, электролиз

Результаты анализа работы систем управления комплексными установками водоочистки показали, что нарушение норм безопасного водоснабжения вызвано главным образом технологическими аспектами. Это не даёт возможности оптимально использовать системы управления на промышленных объектах. Для повышения эффективности комплексных установок водоочистки на основе законов сохранения массы и энергии создана аналитическая модель электролизных процессов в системе безопасного водоснабжения, по среднеквадратическому отклонению проверена её адекватность – 1,4 %. Полученную динамическую математическую модель можно использовать при статистических исследованиях электролизных процессов в системе безопасного водоснабжения.

Fedor I. Goncharov, Volodymyr M. Shtepa

ANALYTICAL RESEARCH ELECTROLYSES PROCESSES OF THE SYSTEM OF SAFE WATER SUPPLY OF INDUSTRIAL TARGETS

National University of the Bioresources and Natureuses of Ukraine

water purification, electrolyse, safe water supply, modelling

It is analysed lacks of the work of control systems by complex water-purifying installations, it is specified in unresolved technological questions which do not give possibility to the use optimum control systems on industrial objects. For increase efficiency of the use of complex water-purifying installations, on the basis of laws of preservation of weight and energy, the analytical model electrolyses processes in the system of safe water supply is developed, adequacy on to the deviation – 1,4 % is checked up. Received the dynamic mathematical model will be used further for carrying out of statistical experiments electrolyses processes in the system of safe water supply.