
doi:<https://doi.org/10.15407/emodel.41.05.017>

УДК 519.62:532.5:681.516.75

А.П. Сафоник, д-р техн. наук, **І.М. Таргоній**, аспірант
Національний університет водного господарства та природокористування
(Україна, 33028, Рівне, вул. Соборна, 11,
тел. +38 (0362) 633209; e-mail: a.p.safonyk@nuwm.edu.ua)

Моделювання та автоматизація процесу отримання коагулянту для освітлення та знебарвлення промислових стічних вод

Розроблено модель електрокоагулятора, яка описує процеси, що протікають в електролізері. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі. Досліджено вплив сили струму на концентрацію двовалентного заліза, температуру води. Розроблено алгоритм двоконтурного регулювання концентрації забруднення у стічних водах із зворотними зв'язками сили струму між пластинами коагулятора і концентрації забруднення у воді, що надходить у автоматизовану систему очищення. Побудовано функціональну схему автоматизації з п'ятьма контурами регулювання та комплексом технічних засобів автоматизації провідних фірм виробників. Запропоновано автоматизовану систему керування процесом очищення стічних вод з реалізацією алгоритму прогнозування коагулянту відносно вхідної концентрації забруднення. Реалізовано управління силою струму в електрокоагуляторі з мінімальними витратами електроенергії. Передбачено управління системою, маючи можливість змінювати продуктивність всієї установки в реальному часі з використанням SCADA — системи WinCC Flexible.

К л ю ч о в і с л о в а: імітаційна модель, електрокоагуляція, коагулянт, автоматизація, регулювання, SCADA.

Сучасні темпи розвитку промисловості вимагають нових шляхів для розробки безвідходного виробництва і максимального зниження екологічного навантаження на довкілля. Це змушує підприємства постійно запроваджувати модернізацію щодо технологій і методів виробництва. Велика частина відходів потрапляє у водне середовище. Саме тому на державному рівні відбувається регулювання складу стічних вод та допустимих концентрацій компонентів на відповідному рівні.

Як відомо, стічні води, які поступають від текстильного виробництва, мають складний хімічний склад. Основними забруднюючими речовинами є органічні фарбники. Склад та концентрація стічних вод від фарбувальних машин залежить від типу тканини, фарбника і процесу фарбування

© Сафоник А.П., Таргоній І.М., 2019

волокна. Ці параметри неодноразово змінюються впродовж робочої зміни. Крім того, в процесах обробки текстилю використовується багато хімічних добавок до розчинів фарби: сіль, кальцинована сода, каустик, оцтова кислота, перекис водню та інші, що також може впливати на рН стічних вод.

Для очистки таких вод необхідно додатково використовувати хімічні реагенти, одним з яких є двовалентне залізо відповідної концентрації. Для отримання даного розчину можна використовувати різні методи, а саме розбавлення залізного купоросу, доставка природної води з високою концентрацією заліза. Проте одним з найпрогресивніших напрямків є метод електрокоагуляції. Його перевагами є висока продуктивність, незначна чутливість до зміни складу водного середовища, відсутність необхідності попереднього видалення розчинених органічних речовин та додаткового введення коагулянтів, наявність промислового випуску різних електрокоагуляційних установок, відсутність транспортних витрат на доставку і закупівлю води та залізного купоросу. Проте в даних системах є і ряд недоліків, серед яких основні — це утворення великої кількості шламу, значні витрати металу анода і електроенергії.

Аналіз останніх досліджень. В процесах очистки стічних вод широко застосовують метод, пов'язаний з накладанням електричного поля — метод електрокоагуляції. Цей метод є пріоритетним напрямком роботи багатьох дослідників [3—6]. У роботах [3, 4] досліджено вплив різних параметрів, таких як матеріал електрода, відстань між електродами, густина струму, а також концентрація забруднюючих речовин на ефективність процесу електрокоагуляції. У роботі [3] також встановлено, що основною перевагою даного процесу є те, що він працює без додавання хімічних продуктів. Тобто постійний струм між електродами використовується як джерело енергії в даній установці.

У роботі [5] описано розроблену математичну модель коагуляції стічних вод та наведено результати аналізу каламутності, зважених речовин, загального фосфору і забрудненості. У роботі [6] розглянуто електрокоагуляційну установку як об'єкт автоматизації, тобто розроблено інформаційну схему системи комплексного очищення стічних вод і визначено адекватну математичну модель по кожному каналу. У роботі [7] з'ясовано, що продуктивність процесу електрокоагуляції збільшується за допомогою перфорованого електрода у порівнянні з плоским електродом. Крім того, помічено менші експлуатаційні витрати даного електрода. Також встановлено, що ці дані є корисними для проектування монополярного електрокоагулятора. Проте постала проблема розроблення і дослідження моделі та автоматизації даного процесу.

Враховуючи викладене, сформулюємо задачі дослідження:

1) провести імітаційне моделювання та отримати розв'язок модельної задачі отримання коагулянту для освітлення та знебарвлення промислових стічних вод при зміні керуючих впливів з використанням додатку рдере середовища MatLab;

2) перевірити точність отриманих результатів через порівняння з експериментальними даними;

3) розробити алгоритм ефективного управління електрокоагулятором для забезпечення заданої концентрації двовалентного заліза при змінній витраті води;

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

Постановка задачі. Для отримання коагулянту під час освітлення та знебарвлення промислових стічних вод узагальнено розроблено в [1] математичну модель з урахуванням міркувань, викладених у роботі [2]. Отже, для визначення розподілів концентрації забруднення C та температури T в електрокоагуляторі розглянемо наступну модельну задачу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v\nabla C - f(x, t, C) = \nabla(D(T)\nabla C),$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\nabla\left(\frac{\lambda_m}{\lambda}\nabla T\right) + \frac{IUea^{1/t}}{c\rho}, \quad (1)$$

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

$$\left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=L} = 0, \quad \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=L} = 0, \quad \left.\frac{\partial C}{\partial x}\right|_{x=0} = 0, \quad \left.\frac{\partial T}{\partial x}\right|_{x=0} = 0. \quad (2)$$

Тут $f(x, t, C)$ — функція типу «джерела» [2]; $D(T) = \bar{D} + D_T$ — сумарний коефіцієнт дифузії, де \bar{D} — коефіцієнт молекулярної дифузії; D_T — коефіцієнт дифузії, який залежить від температури; t — час електрокоагуляції; v — швидкість витікання води з електрокоагулятора; η — ефективність накопичення гідроксиду металу в одній бульбашці; a — коефіцієнт температуропровідності; a_1 — емпіричний коефіцієнт; λ_m — турбулентна теплопровідність; λ — теплопровідність електроліту; U — прикладена напруга; I — сила струму між катодом і анодом; c — питома теплоємність рідини; ρ — густина води [2].

Особливістю такої постановки задачі є те, що в системі рівнянь (1) враховано процеси, що проходять в електрокоагуляторі, як сукупність

взаємодії різних факторів в залежності від температури рідини, сили струму між катодом і анодом, концентрації коагулянту в початковий момент часу, умов навколишнього середовища, води в електрокоагуляторі, конструктивних параметрів реактора тощо.

Для дослідження модельної задачі (1), (2) використаємо додаток рдере програмного середовища Matlab, який дає можливість знаходити розв'язок рівнянь параболічного та еліптичного типів, досліджувати вплив параметрів в даних системах. Для отримання розв'язку необхідно розробити чотири файли, які описують: задану систему рівнянь (pdex2pde.m), початкові умови (pdex2ic.m), граничні умови (pdex2bc.m) та головну функцію (main.m).

Для опису рівняння (1) у файлі pdex2pde.m спочатку необхідно перетворити систему рівнянь (1) в машинний код за наступних даних: $v = 0$ м/с; $I = 70$ А; $U = 24$ В; $a = 0,12 \cdot 10^{-3}$ м²/с; $\lambda_m = 0,39$ Вт/м·с; $a_1 = 880$; $\lambda = 0,4$ Вт/м·с; $c = 3,31 \cdot 10^3$ Дж/кг; $\rho = 1060$ кг/м³; $a_1 = 290$; $D = 10^{-9}$ м²/с. В результаті отримуємо наступний вміст файлу:

```
function [c,f,s] = pdex2pde(x,t,u,DuDx)
n=0.8; Rg=8.31; l=70;
F=96500; db=1.5*10^-6; As=15; P=101325;
a=0.00012; Lm=0.39; L=0.4; U=24; c=3310; po=1060;
V1=0; D1=10^-9;
c1=1; c2=1/a; f1=D1*DuDx(1)-V1*u(1); f2=Lm/L*DuDx(2);
s1=(n*3*Rg*u(2)*l/(8*F*db*As*P)/2.9/(10^-2*(t+1)))u(1);
s2=l*U*exp(8.8/(0.01*t+1))/(c*po*a);
c = [c1; c2];
f = [f1; f2];
s = [s1; s2];
end
```

Щоб описати початкові умови, у файлі pdex2ic.m частину умов (2) перетворюємо відповідно до вимог функції:

$$\begin{aligned} C(x, 0) = C_0(x), & \Leftrightarrow u(x, t_0) = u_0(x), \\ T(x, 0) = T_0(x). & \end{aligned}$$

Вміст файлу pdex2ic.m:

```
function u0 = pdex2ic(x)
u10=0.1;
u20=20;
u0 = [u10;u20];
end
```

Граничні умови (2) з файлу pdex2bc.m зводимо до наступного вигляду:

$$\frac{\partial C(0,t)}{\partial x} = 0, \frac{\partial C(L,t)}{\partial x} = 0, \Leftrightarrow p(x,t,u) + q(x,t)f\left(x,t,u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0,$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0, \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = 0.$$

Наступний код отримуємо у файлі pdex2bc.m:

```
function [pl,ql,pr,qr] = pdex2bc(xl,ul,xr,ur,t)
pl = [0; 0];
ql = [1; 1];
pr = [0; 0];
qr = [1; 1];
end
```

Щоб викликати функцію pdepe, маємо наступний код та використовуємо функції для побудови відповідних графіків. Програмний код:

```
m = 0;
x = linspace(0,0.6,101);
t = linspace(0,240,101);
sol = pdepe(m,@pdex2pde,@pdex2ic,@pdex2bc,x,t);
u1 = sol(:,:,1);
u2 = sol(:,:,2);
t1=[90, 180, 240];
c1=[16.5, 68.4, 101.8];
```

У результаті експериментального дослідження процесу електрокоагуляції визначено концентрацію двовалентного заліза в різні моменти часу:

<i>t</i> , хв	0	90	180	240
Концентрація двовалентного заліза, мг/л	0,1	16,5	68,4	101,8

На рис. 1 і 2 показано вплив температури на швидкість процесу отримання двовалентного заліза при однакових умовах. Проте внаслідок віддачі тепла від води до навколишнього середовища при сталій силі струму енергетичний баланс вирівнюється, тобто кількість тепла, що виділяється при нагріванні води від протікання струму через неї, потрапляє у навколишнє середовище (рис. 1, *a*). В той же час, при меншій температурі води активність вироблення двовалентного заліза не така велика, як в кінці експерименту при більшій температурі. Цей результат отримано за допомогою розробленої моделі та в результаті проведення натурального експерименту (рис. 1, *б*).

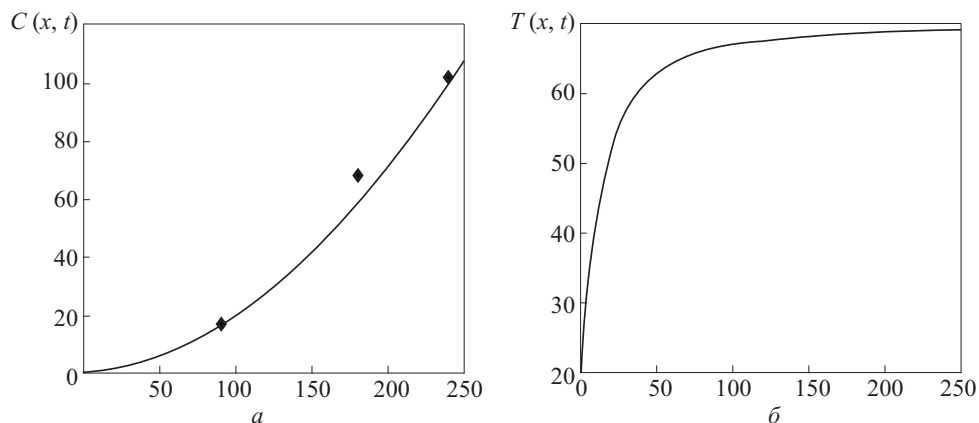


Рис. 1. Графіки розподілу за часом концентрації двовалентного заліза на виході з коагулятора (а) і температури води (б)

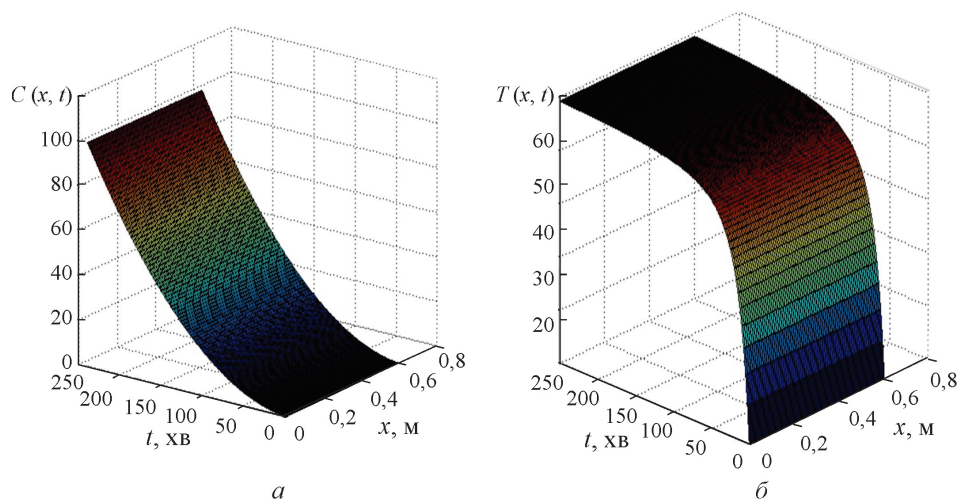


Рис. 2. Просторовий розподіл концентрації двовалентного заліза в електролізері (а) і температури води в електрокоагуляторі (б)

Для розробки алгоритму керування системою враховувано наступні чинники:

електрокоагулятор повинен виробляти задану концентрацію двовалентного заліза при різних витратах стічних вод і концентрації забруднення з мінімальними витратами електроенергії;

сила струму повинна мати заданий рівень.

З урахуванням цього розроблено структурну схему запропонованого алгоритму (рис. 3). Система працюватиме наступним чином: допустима концентрація ДК забруднення Z порівнюється з величиною вхідної концентрації.

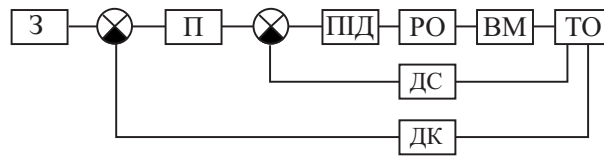


Рис. 3. Структурна схема алгоритму керування допустимою концентрацією домішок в стічних водах

Якщо в систему потрапляє забруднення, концентрація якого перевищує встановлені допустимі норми, запускається система автоматизації.

На першому етапі відбувається подання величини вхідної концентрації забруднення на розроблений П-регулятор [8], який розраховує силу струму, що протікатиме між катодом і анодом для вироблення достатньої кількості заліза, щоб забезпечити допустиму концентрацію забруднення цільового компонента на виході з очисної станції. Отримане значення порівнюється з силою струму, який протікає в електрокоагуляторі на даний момент. Знайдена різниця сили струму подається на стандартний ПД-регулятор, який перетворює вхідний сигнал струму на уніфікований сигнал напруги 0...5 В, за допомогою якого відбувається керування випрямлячем.

На другому етапі відбувається передача сигналів керування від аналогового виходу регулюючого органа РО (в даній системі це контролер) на виконавчий механізм ВМ (випрямляч). Він під'єднаний до мережі живлення 220 В змінної напруги та виробляє сигнал постійної напруги 24 В великих струмів. Аналоговий сигнал із контролера надходить на аналоговий вхід випрямляча, який виробляє пропорційний сигнал на виході 24 В, що подається на катод і анод електрокоагулятора. При такій напрузі у воді протікає струм, який зумовлює процеси відщеплення заліза, що переноситься у технологічний об'єкт ТО (реактор-змішувач). Для підтримання на заданому рівні сили струму використовується давач струму ДС зворотного зв'язку з контролером.

Для дослідження впливу сили струму на концентрацію двовалентного заліза використовуємо результати імітаційного моделювання на основі задачі (1), (2). При цьому всі параметри моделі, такі як величина прикладеної напруги, конструктивні розміри реактора, характеристики води, час моделювання, залишаємо сталими. Отримані результати подано на рис. 4, де показано вплив сили струму на концентрацію двовалентного заліза. Як бачимо, при моделюванні за однакових умов дослідної установки при силі струму 69 А за чотири години концентрація заліза зростає до 85 мг/л, а при 70 А — до 100 мг/л, при цьому температура води у другому випадку більша лише на декілька градусів.

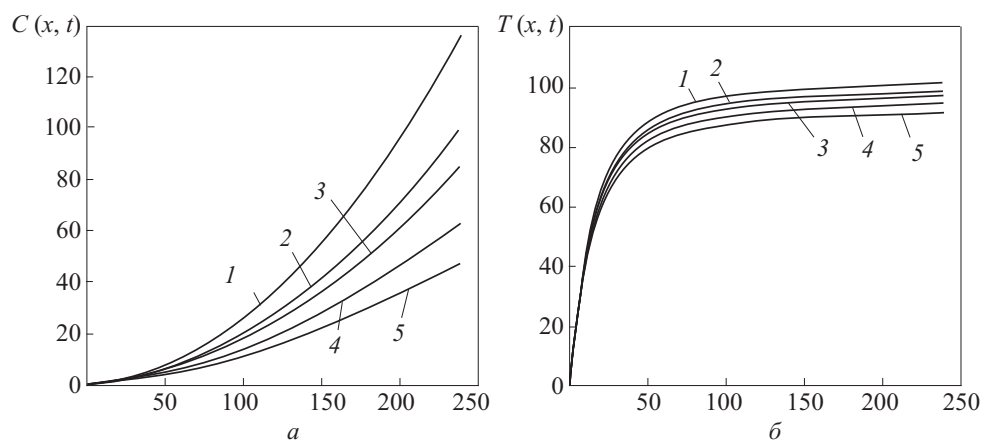


Рис. 4. Графіки зміни концентрації двовалентного заліза при силі струму (а) та температури води з часом на виході з електрокоагулятора (б): 1 — 72 А; 2 — 70 А; 3 — 69 А; 4 — 67 А; 5 — 65 А

Для реалізації запропонованого алгоритму використано технологічну схему очистки стічних вод текстильного виробництва, на основі якої розроблено функціональну схему автоматизації очищення (рис. 5). Вона складається з двох паралельних ліній змішування компонентів. Переведення потоків дозуючих складників відбувається за допомогою системи клапанів. Згідно з цією схемою виробничі стічні води після циклу фарбування та відбілювання тканин, з метою усереднення по витратам та концентраціям, накопичуються в накопичувачі-усереднювачі 1, звідки зануреними насосами подаються на дві паралельні лінії спочатку в реактори першого ступеню 4, 4а, а потім в реактори другого ступеню 5, 5а.

В обидва реактори першого ступеню з баку 2 подається розчин вапняного молока для підтримання в реакторах значення рН = 10,5, потрібного для процесу знебарвлення стічних вод. Регулювання подачі вапняного молока передбачено за допомогою давача рН. З баку 2 приготування коагулянту подається розчин двовалентного заліза. Завершення реакцій знебарвлення відбувається в реакторах другого ступеня 5, 5а.

Для покращення перебігу реакції в реакторах першого та другого ступенів передбачене постійне перемішування повітрям. Знебарвлена вода з реакторів другого ступеню подається у флотатор б. Для покращення процесу флотації в напірний трубопровід подається розчин флокулянту з розчинного баку флокулянту за допомогою насосів-дозаторів. У флотаторі відбувається процес розділення освітленої води від комплексів забруднень за допомогою повітря, яке подається від повітрорудки.

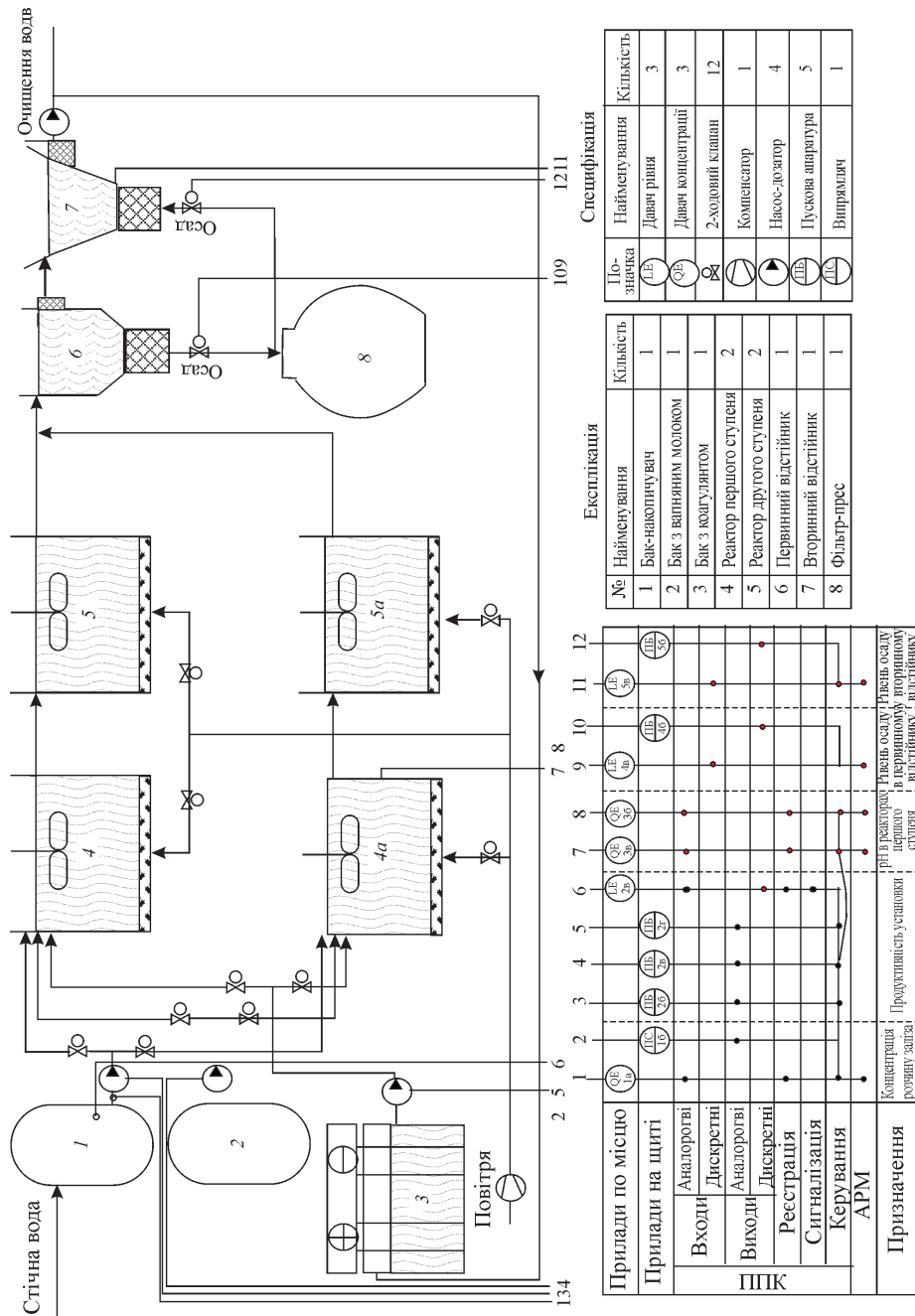


Рис. 5. Функціональна схема автоматизації очищення стічних вод

Після процесу флотації освітлена вода накопичується в кармані чистої води і подається до вторинного відстійника 7 з вбудованим фільтрувальним блоком, де відбувається розділення очищених стічних вод та надлишкової біологічної плівки. Весь накопичений осад з лінії збирається у фільтр-пресі 8.

Після підбору технічних засобів виділено п'ять основних контурів регулювання.

1. *Контур регулювання концентрації заліза* призначений для вироблення достатньої кількості двовалентного заліза, щоб забезпечити якісне вилучення домішок із стічної води. При роботі установки сигнал про концентрацію забруднення надходить з давача на контролер, де обробляється відповідно до алгоритму 1а розробленої керуючої програми (див. рис. 5). Вироблений сигнал з контролера подається на аналоговий вхід випрямляча (алгоритм 1б), який з силової частини подає відповідну напругу на катод і анод для протікання процесу електрокоагуляції. Оскільки провідність води може змінюватися залежно від складу розчину, додатково введено зворотний зв'язок по струму, який протікає між катодом і анодом.

2. *Контур керування продуктивністю установки.* Дозуючі компоненти, а саме вода із забрудненням та розчин двовалентного заліза, подаються насосами-дозаторами, керованими частотними перетворювачами. Таке керування дозволяє в досить широких межах змінювати витрати відповідної складової суміші без заміни компонентів системи. Основним чинником, який впливає на продуктивність системи, є рівень стічної води у баку-накопичувачі. Інформація про наповненість проміжної ємності з давача надходить на контролер, і оператор в режимі реального часу слідкує за даними про стічну воду. Для керування витратами розчинів передбачено поля вводу (виводу), в яких задано значення витрати стічної води, коефіцієнта масштабування розчину води із двовалентним залізом, витрати кожного із компонентів в ручному режимі.

Основним параметром є поле — витрата стічної води, яке визначає продуктивність системи. Оскільки решта компонентів дозується пропорційно, їхні витрати розраховуються як добуток коефіцієнтів зміщення на витрату стічної води. В залежності від отриманих результатів на відповідний частотний перетворювач (2б, 2в, 2г) надходить сигнал з контролера з частотою обертів насоса. Змінюючи оберти насосів, можна керувати продуктивністю установки.

3. *Контур регулювання рН в реакторах першого ступеня.* Для протікання хімічного процесу у знебарвлених стічних водах необхідно підтримувати рН розчину на рівні 10,5. Оскільки стічні води та вироблений коагулянт дозуються в реактори першого ступеня, саме там встановлено

аналогові рН-метри (3а, 3б). Визначальним щодо кислотності середовища є кількість вапняного молока, яке не вступає в реакцію з двовалентним залізом та забрудненням води, але є каталізатором. Тому уніфікований сигнал від давача надходить на контролер, де після обробки згідно з програмою керування виробляється коефіцієнт витрати вапняного молока відповідно до заданого оператором значення. Отримане значення частоти передається частотному перетворювачу 2в, який, змінюючи оберти насоса, керує витратою гідроксиду кальцію, що, в свою чергу, забезпечує оптимальні умови для реакції знебарвлення.

4. *Контур регулювання рівня осаду у первинному відстійнику.* Головним збуренням є витрата та концентрація домішок в стічній воді, яка надходить до системи очищення. При надходженні води у відстійник під дією сили земного тяжіння відбувається постійне осадження грубодисперсних домішок. На заданому рівні, що визначається особливостями процесу, такими як витрата стічної води і концентрація забруднення в ній, виставлено дискретний датчик наявності осаду.

Алгоритм забезпечення заданого рівня механічних домішок наступний: від запуску системи первинний відстійник є пустим і нема дискретного виходу з датчика 4а. З часом при проходженні стічної води відбувається накопичення домішок до тієї пори, поки не спрацює датчик наявності забруднення. Після отримання сигналу з давача контролер згідно алгоритму керування подає сигнал на відкриття відповідного клапану 4б, через який під тиском води у флотаторі і під дією сили земного тяжіння відбувається промивання первинного відстійника протягом певного часу, який визначається в основному збуреннями та висотою встановлення датчика наявності осаду. По закінченні заданого часу клапан закривається і флотатор продовжує накопичувати забруднення.

5. *Контур регулювання рівня сирого осаду у вторинному відстійнику.* Основним збуренням даного технологічного параметру є концентрація завислих речовин у стічних водах, а також швидкість подачі забрудненої води. Оскільки для кращої взаємодії двовалентного заліза і забруднення води використовують постійне перемішування, частина осаду з потоком води не осідає в первинному відстійнику, а надходить до вторинного. Регулювання даного технологічного параметра відбувається через збирання осаду під дією сили тяжіння і вивантаження гідростатичним напором.

На попередній стадії очистки води у первинному відстійнику для прискорення процесу осаду використовують спеціальні добавки — коагулянти або флокулянти. Проте частина домішок потрапляє в карман чистої води і подається до вторинного відстійника, де встановлений дискретний давач рівня осаду 5а. Контролер постійно здійснює опитування модуля дискретного входу для зчитування сигналу про рівень забруднення у

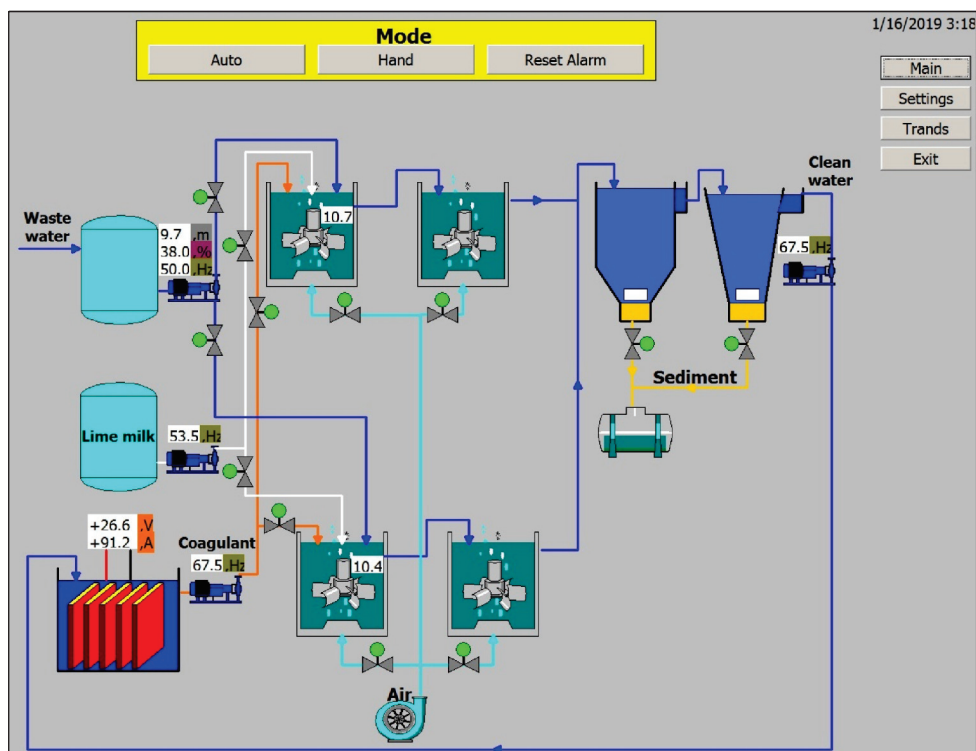


Рис. 6. Мнемосхема керування процесом очистки вод (з екрану)

вторинному відстійнику. Після накопичення достатньої кількості забруднення датчик надсилає сигнал на контролер. Коли результат порівняння стане позитивним, система починає вивантаження осаду в фільтр-прес відкриттям відповідного клапана 5б, після чого починається зменшення рівня осаду у відстійнику під гідростатичним напором. Клапан залишається відкритим до тієї пори, поки рівень сирого осаду не впаде нижче заданої межі.

Для апаратної реалізації даного проекту використовується програмований логічний контролер S-7 300 підприємства «Siemens». Основними складовими програми керування є реалізація методу визначення і підтримування необхідної сили струму між пластинами електрокоагулятора.

Розроблену систему візуалізації керування процесом подано на рис. 6. Основними її функціями є відображення роботи всіх об'єктів в режимі реального часу, наявність ряду параметрів для керування продуктивністю установки.

Для виконання поставленої задачі використано стандартний ПІД-регулятор, який виконує функцію регулювання сили струму відповідно до

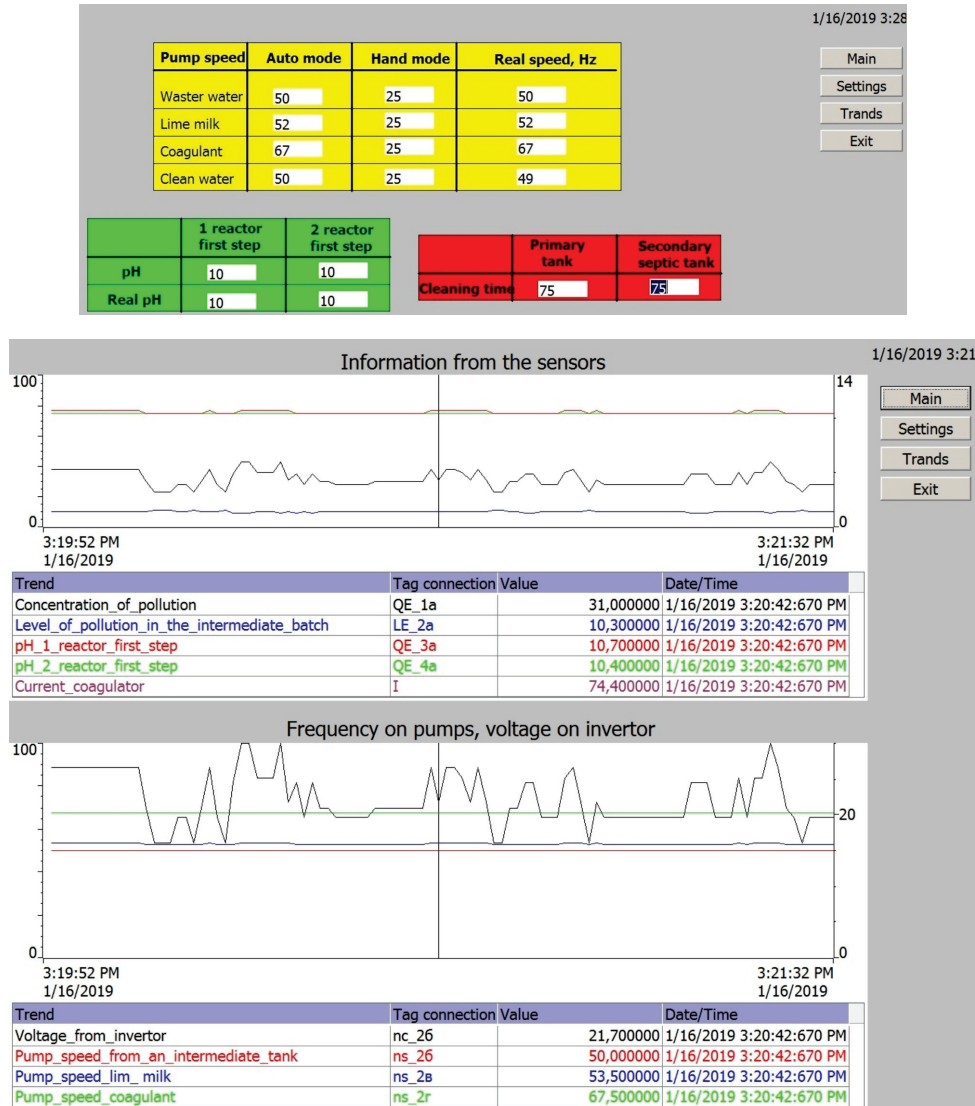


Рис. 7. Вікна Settings і Trands візуалізації процесу (з екрану)

завдання. Також розроблено функціональний блок, який розраховує необхідну силу струму для вироблення достатньої кількості коагулянту при змінній концентрації забруднення, що надходить. Вхідними параметрами даного блоку є концентрація забруднення у стічних водах та емпіричні коефіцієнти, які розраховуються за методом, запропонованим у роботі [8], за допомогою моделювання роботи системи в Matlab.

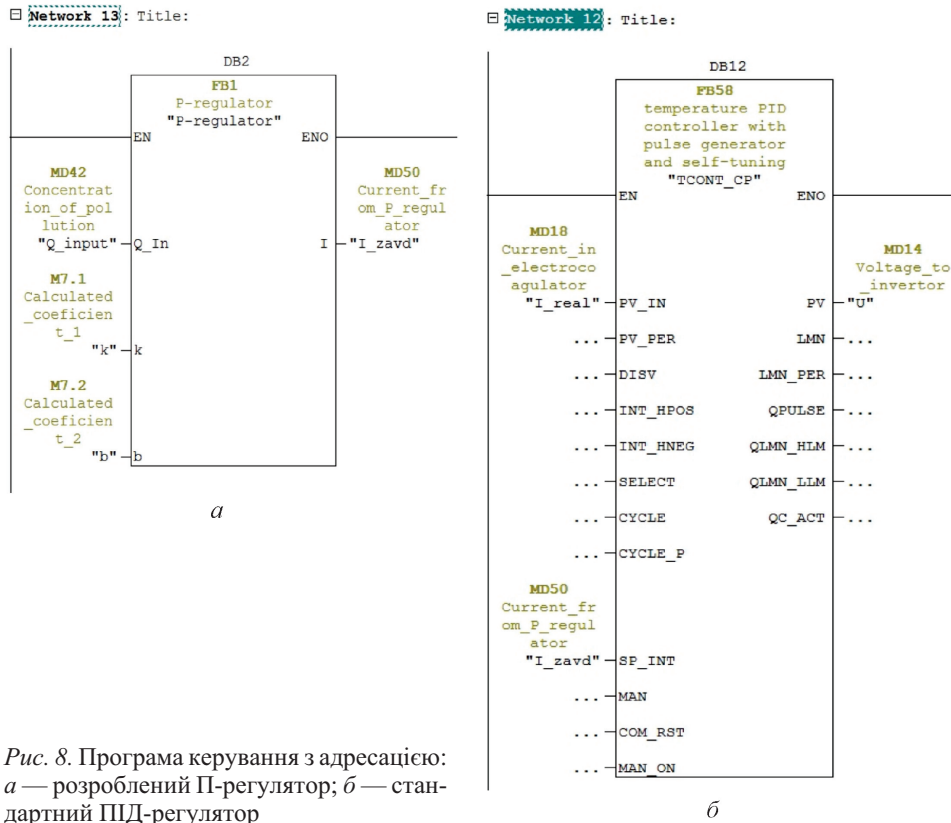


Рис. 8. Програма керування з адресацією: *a* — розроблений П-регулятор; *б* — стандартний ПІД-регулятор

Після реалізації запропонованого алгоритму керування для моніторингу роботи системи в реальному часі розроблено візуалізацію в середовищі WinCC Flexible, до складу якої входить три вікна: Main, Settings, Trands (рис. 7). Екран Main призначений для схематичного відображення технологічного процесу. Вікно Settings використовується для налаштування параметрів системи, зокрема швидкостей роботи насосів в автоматичному та ручних режимах. Екран Trands відображає, як змінюються швидкості роботи насосів та показує інформацію з давачів в режимі реального часу.

На рис. 8, *a*, показано реалізований алгоритм визначення достатньої сили струму між пластинами залежно від вхідної концентрації забруднення у стічних водах. До вхідних параметрів функціонального блоку також входять два коефіцієнти, які визначаються через моделювання роботи системи за методом, запропонованим у [8]. Щоб забезпечити отриману силу струму, застосовується інший контур регулювання з використанням стандартного ПІД-регулятора (рис. 8, *б*).

Висновки

Розроблена система автоматизації очистки стічних вод текстильного виробництва передбачає регулювання п'яти основних контурів керування технічними засобами автоматизації контролером Siemens. Основними перевагами такої системи є наявність автоматичного режиму роботи установки, відображення поточного стану системи в реальному часі, легка керуваність всього процесу через зміну налаштувань у відповідному вікні.

Динаміка зміни концентрації двовалентного заліза від температури води створює передумови для дослідження впливу температури води на швидкість отримання коагулянту. Визначення оптимальної температури води дозволить регулювати продуктивність установок в ширших межах при тих самих конструктивних розмірах і силі струму між пластинами.

Запропонований алгоритм керування системою очистки стічних вод реалізовано в системі автоматизації, яка забезпечує встановлені екологічні норми концентрацій забруднень в очищених стоках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Bomba A. Ya., Safonik A.P.* Mathematical simulation of the process of aerobic treatment of wastewater under conditions of diffusion and mass transfer perturbations // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2018, Vol. 91, No. 2, p. 318—323.
2. *Bomba A., Klymiuk Yu., Prysiazniuk I. et al.* Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by using microporous particles // *AIP Conf. Proc.* 2016, 1773, 040003, p. 1—11.
3. *Kaur R., Arora A., Kaur A. et al.* Treatment of waste water through electrocoagulation // *Pollution Research*, 2018, Vol 37, Issue 2, p. 394—403.
4. *Nayak B.* A review of electrocoagulation process for wastewater treatment // *International Journal of ChemTech Research*, 2018, Vol. 11 No. 03, p. 289—320.
5. *Smoczynski L., Munska K.T., Kosobucka M. et al.* Destabilization of model wastewater in the chemical coagulation process // *Ecological Chemistry and Engineering*, 2014, 21(2), p. 269—279.
6. *Ткачев Р.Ю.* Исследование электрокоагуляционной установки очистки сточных вод как объекта автоматизации // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 2012, № 6(60), с. 48—51.
7. *Khandegar V., Acharya S., Jain A.K.* Data on treatment of sewage wastewater by electrocoagulation using punched aluminum electrode and characterization of generated sludge // *Data in Brief*, 2018, Vol. 18, p. 1229—1238.
8. *Safonyk A., Bomba A., Tarhonii I.* Modeling and automation of the electrocoagulation process in water treatment // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2019, Vol. 871, p. 451—463.

Отримано 02.05.19

REFERENCES

1. Bomba, A.Ya. and Safonik, A.P. (2018), "Mathematical simulation of the process of aerobic treatment of wastewater under conditions of diffusion and mass transfer perturbations", Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 91, no. 2, pp. 318-323.
2. Bomba, A., Klymiuk, Yu. and Prysiazhniuk, I. (2016), "Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by using microporous particles", Proceeding of the AIP Conference, 2016, 1773, 040003, pp. 1-11.
3. Kaur, R., Arora, A., Kaur, A., Singh, N. and Sharma, S. (2018), "Treatment of waste water through electrocoagulation", Pollution Research, Vol 37, Iss. 2, pp. 394-403.
4. Nayak, B. (2018), "A review of electrocoagulation process for wastewater treatment", International Journal of ChemTech Research, Vol. 11, no. 3, pp. 289-320.
5. Smoczynski, L., Munska, K.T. and Kosobucka, M. (2014), "Destabilization of model wastewater in the chemical coagulation process", Ecological Chemistry and Engineering, Vol. 21, no. 2, pp. 269-279.
6. Tkachev, R. (2012), "Study of electrocoagulation installation of wastewater treatment as an object of automation", Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy, no. 6(60), pp 48-51.
7. Khandegar, V., Acharya, S. and Jain, A.K. (2018), "Data on treatment of sewage wastewater by electrocoagulation using punched aluminum electrode and characterization of generated sludge", Data in Brief, Vol. 18, pp. 1229-1238.
8. Safonyk, A., Bomba, A. and Tarhonii, I. (2019), "Modeling and automation of the electrocoagulation process in water treatment", Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 871, pp. 451-463.

Received 02.05.19

А.П. Сафоник, І.Н. Таргоній

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КОАГУЛЯНТА ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ И ОБЕСЦВЕЧИВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Разработана модель электрокоагулятора, описывающая процессы, протекающие в электролизере. Найдено решение соответствующей модельной задачи. Исследовано влияние силы тока на концентрацию двухвалентного железа, температуру воды. Разработан алгоритм двухконтурного регулирования концентрации загрязнения в сточных водах с обратными связями силы тока между пластинами коагулятора и концентрации загрязнения в воде, поступающей в автоматизированную систему очистки. Построена функциональная схема автоматизации с пятью контурами регулирования и комплексом технических средств автоматизации ведущих фирм производителей. Предложена автоматизированная система управления процессом очистки сточных вод с использованием алгоритма прогнозирования коагулянта относительно входной концентрации загрязнения. Реализовано управление силой тока в электролизере с минимальными затратами электроэнергии. Предусмотрено управление системой при возможности изменения производительности всей установки в реальном времени с использованием SCADA — системы WinCC Flexible.

К л ю ч е в ы е с л о в а: имитационная модель, электрокоагуляция, коагулянт, автоматизация, регулирования, SCADA.

A.P. Safonyk, I.M. Targoniу

MODELING AND AUTOMATION OF THE PROCESS
OF THE OBTAINING A COAGULANT FOR CLARIFICATION
AND DISCOLORATION OF INDUSTRIAL WASTEWATER

The model of the electrocoagulator, which describes the processes taking place in the electrolyzer, was developed. The solution of the corresponding model problem was found. The effect of current strength on the concentration of divalent iron, water temperature was investigated. The algorithm of the two-circuit regulation of pollution concentration in sewage with feedback bonds of current between the plates of the coagulator and the concentration of pollution in water arriving in the automated system of purification is developed. A functional scheme of automation with 5 contours of regulation and a selected set of technical means of automation of leading manufacturers of companies was constructed. An automated control system of wastewater treatment was developed with the implementation of a coagulant prediction algorithm in relation to the input pollution concentration. It was implemented to control the current strength in the electrolyzer with minimal electricity consumption. Assumed management system with the ability to change the entire performance settings in real time using SCADA - system WinCC Flexible.

К e y w o r d s: simulation model, electrocoagulation, coagulant, automation, regulation, SCADA.

САФОНИК Андрій Петрович, докт. техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій навчально-наукового Інституту автоматики, кібернетики та обчислюваної техніки Національного університету водного господарства та природокористування. В 2004 р. закінчив Рівненський державний гуманітарний університет. Область наукових досліджень — математичне моделювання і обчислювані методи.

ТАРГОНІЙ Іван Миколайович, аспірант кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій навчально-наукового Інституту автоматики, кібернетики та обчислюваної техніки Національного університету водного господарства та природокористування. В 2015 р. закінчив Національний університет водного господарства та природокористування. Область наукових досліджень — автоматизація технологічних процесів.