

Міністерство освіти і науки України

Шифр роботи: «Електрокоагулятор»

Студентська наукова робота на тему:

**«МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОКОАГУЛЯЦІЙНОГО
ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД З УРАХУВАННЯМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ
МАСООБМІННИХ КОЕФІЦІЄНТІВ»**

Зміст

Номенклатура	3
Вступ.....	5
1. Опис технологічного процесу	7
2. Постановка задачі	9
3. Матеріали і методи	16
3.1. Моделювання процесу електрокоагуляційної очистки.....	16
3.2. Оптимізація процесу електрокоагуляційної очистки	20
4. Експерименти	21
4.1. Дослідження процесу електрокоагуляційного очищення	21
4.2. Оптимізація та керування процесом електрокоагуляційної очистки.....	24
5. Програмна реалізація процесу електрокоагуляційного очищення.....	30
Висновок	33
Список літератури	34

Номенклатура

ρ	– густина рідини ($кг / м^3$)
v	– усереднений середній вектор швидкості ($м / с$)
μ	– динамічна в'язкість ($Па \cdot с$)
μ_T	– умова турбулентної в'язкості ($Па \cdot с$)
η	– ефективність накопичення гідроксиду металу однією бульбашкою
R_g	– газова константа ($Дж / (моль \cdot К)$)
I	– сила струму ($А$)
F	– це стала Фарадея ($Кл / моль$)
d_b	– діаметр бульбашок ($м$)
A_s	– площа поперечного перерізу камери ($м^2$)
a	– коефіцієнт температуропровідності ($м^2 / с$)
λ_m	– турбулентна теплопровідність ($Вт / (м \cdot с)$)
λ	– теплопровідність електроліту ($Вт / (м \cdot с)$)
U	– прикладена напруга ($В$)
$\alpha(t)$	– шуканий коефіцієнт, що характеризує масові об'єми відірваних від гранул завантаження частинок
$\mu(t)$	– функція, що характеризує масові розподілу осаду з часом, знаходиться експериментальним способом
t	– час ($хв$)
c	– теплоємність ($Дж / кг$)
Sc_T	– турбулентне число Шмідта
C	– концентрація цільового компонента у воді ($кг/м^3$)
C_{in}	– концентрація забруднення на вході в електролізер ($кг/м^3$)
T	– температура води в електрокоагуляторі ($^{\circ}C$)
T_z	– температура зовнішнього середовища ($^{\circ}C$)
T_{in}	– температура вхідної рідини ($^{\circ}C$)
$a_0 \dots a_3$	– емпіричні коефіцієнти
S	– площа поверхні робочої зони апарата ($м^2$)

L	– об'ємні витрати рідини (m^3)
V	– об'єм робочої зони електролізера (m^3)
K	– коефіцієнт тепловіддачі
H	– тепловий ефект процесу реакції електрокоагуляції (Дж)
t_2	– стала часу (хв)
P	– атмосферний тиск (Па)
D	– сумарний коефіцієнт дифузії
D_Q	– коефіцієнт дифузії (m^2 / c)
S_Q	– джерело
k	– турбулентна кінетична енергія
P_k	– утворення турбулентної енергії
U_0	– середня швидкість потоку на вході (m / c)
n	– одиничний нормальний вектор
P_0	– тиск на виході (Па)
θ	– пульсаційна складова температури
q_V	– інтенсивність внутрішніх джерел теплоти ($Вт / m^3$)
\bar{D}	– коефіцієнт молекулярної дифузії (m^2 / c)
D_{turb}	– коефіцієнт турбулентної дифузії (m^2 / c)
Q_G	– це об'ємна витрата газу ($л / c$)
Q_H	– об'ємна витрата водню ($л / c$)
Q_O	– об'ємна витрата кисню ($л / c$)
V_0	– молярний об'єм газів у нормальному стані
n_H	– кількість переносу електронів H_2
n_O	– кількість переносу електронів O_2
δ	– малий параметр, що характеризує переважання конвективної та масообмінної складової процесу масоперенесення

Вступ

Актуальність теми. Зростання міст, розвиток промисловості, інтенсивність розвитку сільського господарства, поліпшення побутових умов, велика кількість інших чинників все більше ускладнюють і збільшують проблеми забезпечення водою та потреби у воді, які щорічно зростають. Велику кількість води споживають хімічні та металургійні промисловості, тваринництво та господарство. А з розвитком енергетики різко зросла і потреба у воді. Значна кількість після використання потрапляє у навколишнє середовище, що згубно впливає на екологію та її екосистеми.

В наш час особливу увагу викликає контроль забруднення навколишнього середовища, а також очищення забрудненої води. Попередженням забруднення водних об'єктів стічними водами може бути забезпечене організаційними (попередження скидання стічних вод у водойми без їхнього очищення) та технічними заходами (очищення стічних вод різними методами).

Найбільш ефективним методом очистки стічних вод у всьому світі, протягом останнього десятиліття, вважають процес електрокоагуляції.

Процес електрокоагуляції - це надійний, економічно доцільний, прогресивний метод, що має підвищену здатність до автоматизації, модернізації та високу ефективність видалення забруднюючих речовин.

Контроль показників технологічних процесів є необхідною умовою високого рівня розвитку будь-яких виробництв, промисловостей чи підприємств. Причому даний контроль необхідно проводити з урахуванням всіх факторів впливу на той чи інший технологічний процес.

При такому підході велике значення має імітаційне моделювання об'єкта з урахуванням його взаємозв'язків з всіма вхідними та збурюючими даними.

Моделювання як метод є потужним інструментом досліджень у всіх областях праці. Цей метод набуває сьогодні особливої ваги, насамперед як інструмент удосконалення управління економікою та її галузями в межах усієї України. Є всі підстави стверджувати, що імітаційне моделювання – один з

найзагальніших та найпотужніших методів прикладного системного аналізу. Адже розроблення методів, створення та використання технічних засобів та пристроїв для неруйнівного контролю якісних показників та для технічної діагностики стану різноманітної продукції є неможливим без імітаційного моделювання процесів. За допомогою імітаційних моделей системи розкривається сутність відповідних явищ і процесів за умови, що натуральні досліди в реальному середовищі на реальних об'єктах виключаються.

Мета роботи. Розробити імітаційну модель отримання коагулянту для освітлення та знебарвлення промислових стічних вод, яка враховує процеси, що протікають в електрокоагуляторі. Дослідити вплив сили струму на зміну концентрації коагулянту та температури води. На основі результатів даної імітаційної моделі дослідити процес зворотного впливу характеристик середовища на характеристики процесу. Показати вплив сили струму на концентрацію та температуру речовини.

Об'єкт дослідження. Процес електрокоагуляційної очистки, освітлення та знебарвлення промислових стічних вод.

Предмет дослідження. Математична модель процесу отримання коагулянту для освітлення та знебарвлення промислових стічних вод.

Методи досліджень. У роботі використано методи математичної фізики та гідродинаміки при побудові моделі отримання коагулянту для освітлення та знебарвлення промислових стічних вод. Для оцінки динамічних характеристик процесів, що протікають в електрокоагуляторі і дослідження впливу сили струму на концентрацію коагулянту використано імітаційний метод з використанням функції `pdepe`, що є додатком до пакету для числового аналізу Matlab. Для наведення та аналізу візуального розповсюдження температури та руху концентрації в електрокоагуляційній установці в певні моменти часу та за вказаних вхідних даних використано додаток програмного пакету Matlab, а саме `FeaTool Multiphysics`.

1. Опис технологічного процесу

Суть процесу електрокоагуляції для очищення й обробки вод, полягає в осіданні колоїдних систем в силу постійного впливу електричного струму. В ході процедури, присутні в рідині, що очищується, технічні солі піддаються електричній дисоціації, а іони вибірково взаємодіють з шкідливими домішками і випадають в осад у вигляді звичайних гелів. Сучасна установка електрокоагуляції зазвичай використовується в металургії, а також в гірничорудному виробництві. Спеціальна технологія роботи підприємств передбачає використання великої кількості технічних рідин, тому використовується їх якісне очищення і подальше вторинне використання. Розчинні у воді речовини викликають неполадки у роботі технологічного обладнання. В основному це пов'язано з утворенням в теплових агрегатах накипних відкладень і процесом корозії [1,18].

Ця технологія використовується в нафтових і газових, будівельних та гірничодобувних галузях для обробки емульгованого масла, загальних нафтових вуглеводнів, суспензій, важких металів та інших важкодоступних забруднювачів.

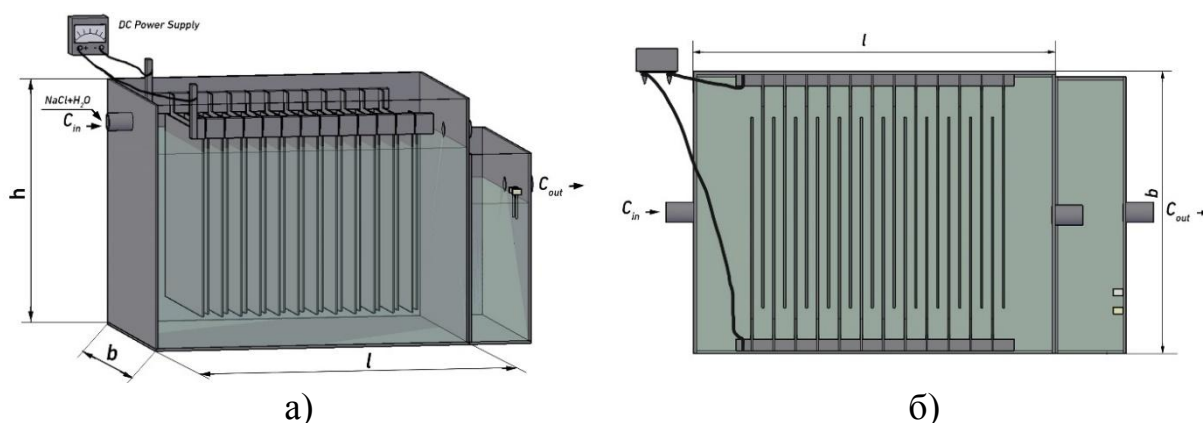


Рис. 1.1. Схема електрокоагуляційної установки: а) виліт збоку; б) виліт зверху

Електрокоагуляція здійснюється шляхом нанесення електричного струму на металеві пластини, які занурюються у воду (рис.1.1). Важкі метали, органічні речовини та неорганічні сполуки, перш за все, утримуються у воді електричними зарядами. Застосовуючи інший електричний заряд до

забрудненої води, заряди, що тримають разом частинки, дестабілізуються і відокремлюються від чистої води. Потім частинки коагулюються, щоб утворити масу, яку можна легко видалити.

Сутність електрохімічної обробки води полягає в тому, що при подачі напруги постійного струму на електроди починається процес розчинення залізних анодів.

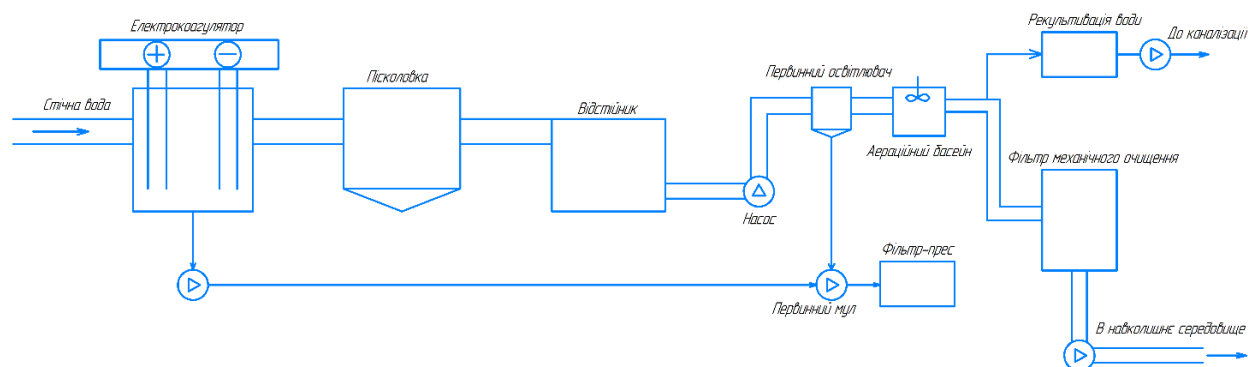


Рис. 1.2. Технологічна схема процесу електрокоагуляції

Вихідні кислотно-лужні води надходять до електрокоагулятора (рис.1.2.), в якому відбувається відновлення іонів шестивалентного хрому і очищення від домішок важких металів. З електрокоагулятора водна суспензія направляється у пісколовку для фільтрування рідини. Після пісколовки рідна поступає на камеру з припливним насосним агрегатом, де вона подається на первинний освітлювач для поділу суспензії на освітлену рідину і осад. Освітлена вода, зливається в аераційний басейн, де видаляється з неї CO_2 . Далі вода подається на фільтр механічного очищення або на вузол доочищення. Тонкодисперсні часточки, що не вдається видалити з рідини у відстійниках, можуть бути вилучені за допомогою фільтрування. Для прискорення процесу фільтрування виробляється під тиском або за допомогою вакууму [2-3, 15-17].

Електрокоагуляція може бути використана як попередня обробка для таких процесів, як розслаблення, зворотний осмос і ультрафільтрація або як обробка полірування в кінці традиційних процесів обробки. Технологія зазвичай виключає необхідність застосування хімічних або біологічних добавок або демульгаторів. Без хімічних речовин також немає необхідності в хімічних змішувальних баках.

2. Постановка задачі

Моделювання процесів виконано на основі рівнянь, що описують рух нестисливої рідини між електродами. Структура потоку в електрокоагуляторі може бути або ламінарною, або турбулентною. В складній геометрії поле швидкості включає випадковий турбулентний компонент, який генерує потоки струменя та турбулентні вихри [19].

Рівняння неперервного потоку включають рівняння динаміки рідини, маси, імпульсу та рівняння енергії і забезпечують основу для моделювання процесу. Ці рівняння мають багато спільних рис, так що загальну змінну Q можна використовувати для опису традиційних форм рівняння потоку рідини, включаючи скалярні величини, такі як температуру та концентрацію. Це загальне рівняння записується у такому вигляді [4]:

$$\frac{\partial(\rho Q)}{\partial t} + \nabla(\rho v Q) = \nabla(D_Q \nabla Q) + S_Q. \quad (1)$$

Для електрохімічних систем рівняння (1) спрощується через рівняння масової неперервності та рівняння Нав'є-Стокса [5].

Основні рівняння для нестисливого турбулентного потоку можуть бути сформульовані наступним чином [6]:

$$\rho(v \nabla)v = -\nabla P + \nabla\left((\mu + \mu_T)(\nabla v + (\nabla v)^T)\right), \quad (2)$$

$$\nabla(\rho v) = 0. \quad (3)$$

Так звані напруження Рейнольдса можуть бути виражені з умови турбулентної в'язкості μ_T відповідно до стандартної моделі $k - \varepsilon$ турбулентності:

$$\mu_T = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon, \quad (4)$$

$$\rho(v \cdot \nabla)k = \nabla\left((\mu + \mu_T / \sigma_k)\nabla k\right) + P_k - \rho \varepsilon, \quad (5)$$

$$\rho v \cdot \nabla \varepsilon = \nabla\left((\mu + \mu_T / \sigma_\varepsilon)\nabla \varepsilon\right) + C_{e1} P_k \varepsilon / k - C_{e2} \rho \varepsilon^2 / k, \quad (6)$$

$C_\mu = 0,09$, $C_{e1} = 1,44$, $C_{e2} = 1,92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$ – отримують за

експериментальними даними [7]. Граничні умови для рівнянь (2) - (6):

$$v = -U_0 n, \quad (7)$$

$$\left[-P + (\mu + \mu_T) (\nabla v + (\nabla v)^T) n \right] = -P_0 n. \quad (8)$$

У неізотермічному турбулентному потоці пульсації швидкостей викликають пульсації температур $T = \bar{T} + \theta$. Для випадку $\rho = const$ і $\lambda = const$, застосовуючи до рівняння теплопровідності правила осереднення, отримаємо:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} = a \nabla^2 \bar{T} + \frac{q_v}{c\rho} + \text{div}(-\bar{V}\theta). \quad (9)$$

Ввівши поняття турбулентної теплопровідності $\lambda_m = -\frac{\rho \bar{V}\theta}{dT/dy}$, отримаємо:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla \left(1 + \frac{\lambda_m}{\lambda} \nabla T \right) + \frac{q_v}{c\rho}, \quad (10)$$

Кількість теплоти, що виділяється під час електродного нагрівання рідини, пропорційна силі струму, часові його проходження і падінню напруги $q_v = I \cdot U \cdot t$.

Зміну концентрації C можна описати за допомогою скалярного рівняння перенесення з внесками турбулентної дифузії [8-9]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \nabla C + \nabla (D \nabla C) + S_C, \quad (11)$$

$D = \bar{D} + D_{turb}$, D_{turb} – залежить від турбулентного числа Шмідта Sc_T (згідно моделі Кейса-Кроуфорда[9]):

$$D_{turb} = \frac{\mu_T}{\rho Sc_T}, \quad Sc_T = \left(\frac{1}{2Sc_{T\infty}} + \frac{0.3}{\sqrt{Sc_{T\infty}}} \frac{\mu_T}{\rho D} - \left(0.3 \frac{\mu_T}{\rho D} \right) \left(1 - e^{-\frac{\rho D}{0.3 \mu_T \sqrt{Sc_{T\infty}}}} \right) \right)^{-1},$$

$$Sc_{T\infty} \approx 0.85.$$

Ефективність утворення флоків (коагулянту) значною мірою залежить від розміру утворених бульбашок [10]. Електрофлотация виробляє велику кількість тонкодисперсних газових бульбашок, розмір яких коливається від 5 до 90 мкм залежно від стану електролізу. Менші розміри бульбашок створюють

кращу кінетику флотації через високе співвідношення площі поверхні до об'єму. Більше того, малі бульбашки мають більшу ймовірність отримання меншого кута контакту в системі трифазного (газо-твердо-рідина), ніж більші бульбашки. Менший контактний кут виробляє більш стійкі агрегати. Крім того, час утримання дрібних бульбашок у флотаційному агрегаті довший, ніж в час затримання більших бульбашок, оскільки вони мають нижчу швидкість руху. Це сприяє збільшенню ймовірності зіткнення газових бульбашок і флоків. І навпаки, зсувні сили більших бульбашок є високими внаслідок високої швидкості руху, що може спричинити розрив флоків.

Сумарну кількість бульбашок в електрокоагуляторі на одиницю часу визначають як [10]:

$$N_{bT} = \frac{Q_G}{\pi d_b^3 / 6}, \quad (12)$$

$$Q_G = Q_H + Q_O$$

Q_H , Q_O – в нормальному стані можна розрахувати згідно закону Фарадея:

$$Q_H = \frac{IV_0}{Fn_H}, \quad Q_O = \frac{IV_0}{Fn_O}. \quad (13)$$

Тому загальна швидкість утворення бульбашок пропорційна силі струму[11]:

$$Q_G = \frac{IV_0}{F} \left(\frac{1}{n_H} + \frac{1}{n_O} \right) = 1.74 \cdot 10^{-4} I. \quad (14)$$

В [12] описано осадження броунівських частинок до бульбашок водню. Так швидкість флотаційної складової процесу електрофлотації кількісно описується наступним чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \alpha(t)C. \quad (15)$$

Таким чином, для знаходження розподілів концентрації коагулянту C та температури T в електрокоагуляторі задається система:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = -v\nabla C + \nabla(D(T)\nabla C) + \alpha(t)C, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = a\nabla\left(1 + \frac{\lambda_m}{\lambda}\nabla T\right) - v\nabla T + \frac{IUt}{c\rho}, \end{cases} \quad (16)$$

$$\alpha(t) \iint_G C(\tilde{x}, \tilde{y}, t) = \mu(t), \quad (17)$$

$$C(x, y, 0) = C_0(x, y), T(x, y, 0) = T_0(x, y),$$

$$C(0, y, t) = C_*(y, t), T(0, y, t) = T_*(y, t),$$

$$C(L, y, t) = C^*(y, t), T(L, y, t) = T^*(y, t),$$

$$\left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \left. \frac{\partial C}{\partial y} \right|_{y=y^*} = 0, \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = -a(T(x, 0, t) - T_*^*),$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=y^*} = -a(T(x, y^*, t) - T_*^*), \quad (18)$$

де (17) – умова перевизначення [11];

Врахування співвідношення між величинами параметрів, які характеризують певні складові процесу, зокрема домінування конвективних та масообмінних складових над дифузійними, приводить до ускладнення математичної моделі процесу сингулярностями, породженими малими параметрами. Одним із ефективних шляхів розв'язання відповідних задач у випадку переважання конвективних складових процесу над дифузійними при фільтрації водних розчинів в модельних областях, обмежених еквіпотенціальними або квазіеквіпотенціальними лініями та лініями течії, є: поетапна фіксація характеристик і складових процесу та середовища; розв'язання задач фільтрації з використанням конформних або квазіконформних відображень області комплексного потенціалу або квазіпотенціалу на фізичну область; перехід у рівняннях конвективної дифузії і граничних та початкових умовах від фізичних змінних до координат області комплексного потенціалу або квазіпотенціалу, що значно спрощує їх запис і забезпечує можливість проведення автономних досліджень, розпаралелювання

обчислень. Врахувавши, що задача на знаходження поля швидкостей (2) – (8) є розв’язаною [13], зокрема, обчислено поле швидкостей v і ряд інших величин, наприклад фільтраційну витрату, та, здійснивши заміну змінних $x = x(\varphi, \psi)$, $y = y(\varphi, \psi)$ у системі (16) та умовах (18), отримано відповідну “дифузійну задачу” [13- 14], розв’язок якої з точністю $O(\delta^{n+1})$, де δ – малий параметр, що характеризує переважання конвективної та масообмінної складової процесу масоперенесення

($D(T) = \delta d(T)$, $|v| > v_* \gg \delta$), шукатимемо у вигляді асимптотичних рядів [14]:

$$C(\varphi, \psi, t) = \sum_{i=0}^n \delta^i C_i(\varphi, \psi, t) + \sum_{i=0}^{n+1} \delta^i \bar{C}_i(\xi, \psi, t) + \sum_{i=0}^{2n+1} \delta^{i/2} \underline{C}_i(\varphi, \zeta, t) + \sum_{i=0}^{2n+1} \delta^{i/2} \hat{C}_i(\varphi, \phi, t) + R_C(\varphi, \psi, t, \delta), \quad (19)$$

$$T(\varphi, \psi, t) = \sum_{i=0}^n \delta^i T_i(\varphi, \psi, t) + \sum_{i=0}^{n+1} \delta^i \bar{T}_i(\xi, \psi, t) + \sum_{i=0}^{2n+1} \delta^{i/2} \underline{T}_i(\varphi, \zeta, t) + \sum_{i=0}^{2n+1} \delta^{i/2} \hat{T}_i(\varphi, \phi, t) + R_T(\varphi, \psi, t, \delta), \quad (20)$$

$$\alpha = \alpha_0 + \sum_{i=1}^k \varepsilon^i \alpha_i + R_\alpha, \quad (21)$$

де R_C, R_T, R_α – залишкові члени розкладів, $C_i(\varphi, \psi, t)$, $T_i(\varphi, \psi, t)$, $\alpha_i(t)$ – регулярні частини асимптотики, $\bar{C}_i(\xi, \psi, t)$, $\bar{T}_i(\xi, \psi, t)$ – функції типу примежового шару на виході фільтраційного потоку із області, $\underline{C}_i(\varphi, \zeta, t)$, $\underline{T}_i(\varphi, \zeta, t)$, $\hat{C}_i(\varphi, \phi, t)$, $\hat{T}_i(\varphi, \phi, t)$ – функції типу примежового шару в околах бокових стінок електрокоагулятора, $\xi = (L - x) \cdot \delta^{-1}$, $\zeta = y \cdot \delta^{-1/2}$, $\phi = (y^* - y) \cdot \delta^{-1/2}$ – відповідні регуляризуючі перетворення.

Вирази для регулярних частин асимптотики знайдені в результаті застосування процедури підстановки рядів (19) – (21), прирівняння коефіцієнтів при однакових степенях малого параметра і розв’язання відповідних задач:

$$T_i(\varphi, \psi, t) = \begin{cases} \int_0^t \tilde{T}_i(f^{-1}(\tilde{t} - t + f(\varphi, \psi), \psi), \tilde{t}) d\tilde{t} + \tau_{*i}^*(\varphi, \psi), & t \leq f(\varphi, \psi), \\ \int_{\varphi_*}^{\varphi} \frac{\tilde{T}_i(\tilde{\varphi}, f(\tilde{\varphi}, \psi) + t - f(\varphi, \psi))}{v(\tilde{\varphi}, \psi)} d\tilde{\varphi} + \tau_i^*(\varphi, \psi), & t > f(\varphi, \psi), i = \overline{0, n} \end{cases}$$

$$C_0(\varphi, \psi, t) = \begin{cases} e^{\varphi_*} \int_{\varphi_*}^{\varphi} \frac{g_0(\tilde{\varphi}, f(\tilde{\varphi}, \psi) - f(\varphi, \psi) + t)}{v(\tilde{\varphi}, \psi)} d\tilde{\varphi} & C_0(t - f(\varphi, \psi)), & t > f(\varphi, \psi), \\ e^0 \int_0^t g_0(f^{-1}(\tilde{t} + f(\varphi, \psi) - t), \psi, \tilde{t}) d\tilde{t} & C_*\left(f^{-1}(f(\varphi, \psi) - t, \psi)\right), & t \leq f(\varphi, \psi), \end{cases}$$

$$\alpha_0(t) \iint_G C_0 = \mu(t),$$

$$C_i(\varphi, \psi, t) = \begin{cases} e^{\varphi_*} \int_{\varphi_*}^{\varphi} \frac{g_i(\varphi, \psi, f(\tilde{\varphi}, \psi) - f(\varphi, \psi) + t)}{v(\tilde{\varphi}, \psi)} d\tilde{\varphi} \int_{\varphi_*}^{\varphi} \frac{h_i(\varphi, \psi, f(\tilde{\varphi}, \psi) - f(\varphi, \psi) + t)}{v(\tilde{\varphi}, \psi)} e^{-\int_{\varphi_*}^{\tilde{\varphi}} \frac{g_i(\tilde{\varphi}, \psi, f(\tilde{\varphi}, \psi) - f(\varphi, \psi) + t)}{v(\tilde{\varphi}, \psi)} d\tilde{\varphi}} d\tilde{\varphi}, & t > f(\varphi, \psi), \\ e^0 \int_0^t g_i(f^{-1}(\tilde{t} + f(\varphi, \psi) - t), \psi, \tilde{t}) d\tilde{t} \int_0^t h_i(f^{-1}(\tilde{t} + f(\varphi, \psi) - t), \psi, \tilde{t}) e^{-\int_0^{\tilde{t}} g_i(f^{-1}(\tilde{t} + f(x) - t), \psi, \tilde{t}) d\tilde{t}} d\tilde{t}, & t \leq f(\varphi, \psi), i = \overline{1, n}, \end{cases}$$

$$\alpha_0 \iint_G C_i + \alpha_1 \iint_G C_{i-1} + \dots + \alpha_i \iint_G C_0 = 0.$$

$$\text{де } f(\varphi, \psi) = \int_{\varphi_*}^{\varphi} \frac{d\tilde{\varphi}}{v(\tilde{\varphi}, \psi)}, \quad \tilde{T}_0(\varphi, \psi, t) = \frac{IUt}{c\rho}, \quad \tau_0^*(\varphi, \psi) = T^*\left(f^{-1}(f(\varphi, \psi) - t, \psi)\right),$$

$$\tau_{*0}^*(\varphi, \psi) = T_0(t - f(\varphi, \psi), \psi) \quad \tilde{T}_i(\varphi, \psi, t) = \bar{d}_T \left(\frac{\partial^2 T_{i-1}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{i-1}}{\partial \psi^2} \right), \quad \bar{d}_T = \frac{a\lambda_m}{\delta\lambda},$$

$$\tau_i^*(\varphi, \psi) = \tau_{*i}^*(\varphi, \psi) = 0 \quad (i = \overline{1, n}), \quad g_i(\varphi, \psi, t) = \eta \frac{3R_g IT_i(\varphi, \psi, t)}{8Fd_b A_s P},$$

$$h_i(\varphi, \psi, t) = \bar{d}_{iC} \left(\frac{\partial^2 C_{i-1}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 C_{i-1}}{\partial \psi^2} \right), \quad \bar{d}_{iC} - \text{відомі функції, які є сумою добутоків}$$

членів

ряду (19)–(21), їх частинних похідних, а також коефіцієнти при i -тих степенях малого параметра у розкладі відповідних функцій $d(L - \xi\delta, \psi, t)$ у ряд Тейлора в околі $\varphi = L$. Функції типу примежового шару знаходимо аналогічно до [14].

Особливістю такої постановки проблеми є те, що в системі рівнянь (16) враховано процеси, які 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 електрокоагулятора тощо.

3. Матеріали і методи

3.1. Моделювання процесу електрокоагулягійної очистки

Для дослідження модельної задачі (16)-(18) 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 на основі додатку рдере необхідно розробити 4 файли, які описують: задану систему рівнянь (pdex2pde.m), початкові умови (pdex2ic.m), граничні умови (pdex2bc.m) та головну функцію (main.m).

Для опису рівняння (16) у файлі pdex2pde.m спочатку необхідно перетворити систему рівнянь (16) в машинний код:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} + v \cdot \nabla C - \alpha(t)C = \nabla(D(T)\nabla C), \\ \frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \nabla \left(\frac{\lambda_m}{\lambda} \nabla T \right) + \frac{I \cdot U \cdot e^{-\frac{a_2}{t}}}{c\rho}, \end{cases}$$

⇕

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

В результаті отримали наступний вміст файлу:

```
function [c,f,s] = 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; 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)*I/(8*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
```

Щоб описати початкові умови у файлі pdex2ic.m частину умов (18) перетворили відповідного до вимог функції.

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

Вміст файлу `pdex2ic.m`:

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

Граничні умови (18) з файлу `pdex2bc.m` звели до наступного вигляду.

$$\begin{cases} \frac{\partial C(0,t)}{\partial x} = 0, & \frac{\partial C(L,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = 0, & \frac{\partial T(L,t)}{\partial x} = 0. \end{cases}$$

$$\Downarrow$$

$$p(x,t,u) + q(x,t) \cdot f(x,t,u, \frac{\partial u}{\partial x}) = 0.$$

Наступний код отримали 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 використаємо стандартні 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];
figure
```

```

surf(x,t,u1)
title('Concentration of divalent iron C(x,t)')
xlabel('Distance x, m')
ylabel('Time t, min')
figure
plot(t,u1(:,20:20:101),t1,c1,'*')
title('Concentration of divalent iron C(x,t)')
xlabel('Time t, min')
shading flat
figure
plot(x,u1(20:20:101,:))
title('Concentration of divalent iron C(x,t)')
xlabel('Distance x, m')
shading flat
figure
surf(x,t,u2)
title('Temperature T(x,t)')
xlabel('Distance x, m')
ylabel('Time t, min')
figure
plot(t,u2(:,1:25:101))
title('Temperature T(x,t)')
xlabel('Time t, min')
shading flat
figure
plot(x,u2(1:25:101,:))
title('Temperature T(x,t)')
xlabel('Distance x, m')
shading flat

```

Після запуску на виконання файла main.m отримали результати моделювання, які представлено на рис. 3.1, 3.2 за наступних вхідних даних:

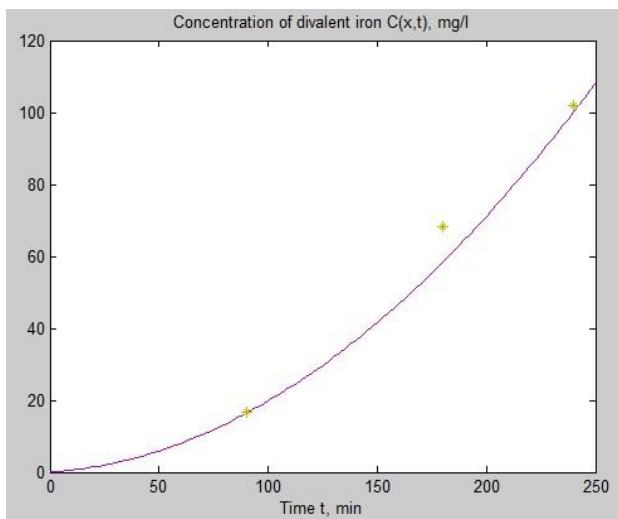
$$\begin{aligned}
\nu &= 0, \text{ м / с}; & \eta &= 0.8; & R_g &= 8.31, \text{ Дж / (моль} \cdot \text{К)}; & F &= 9.65 \cdot 10^4, \text{ Кл / моль}; \\
I &= 70, \text{ А}; & A_s &= 15, \text{ м}^2; & d_b &= 1.5 \cdot 10^{-6}, \text{ м}; & U &= 24, \text{ В}; & a &= 0.12 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^2 / \text{с}; \\
\lambda_m &= 0.39, \text{ Вт / м} \cdot \text{с}; & a_2 &= 880; & \lambda &= 0.4, \text{ Вт / м} \cdot \text{с}; & c &= 3.31 \cdot 10^3, \text{ Дж / кг}; \\
\rho &= 1060, \text{ кг / м}^3; & a_1 &= 290; & D &= 10^{-9}, \text{ м}^2 / \text{с}.
\end{aligned}$$

В таблиці 3.1 наведені результати експериментального дослідження процесу електрокоагуляції, а саме визначена концентрація двовалентного заліза в різні моменти часу.

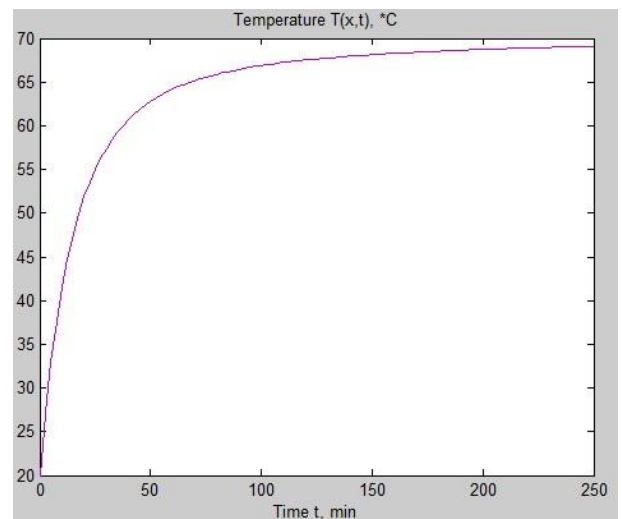
Таблиця 3.1. Вихідні дані експерименту

Час, хв	Концентрація двовалентного заліза, мг/л
0	0,1
90	16,5
180	68,4
240	101,8

Результати натурального експерименту та розрахунок модельної задачі (16)-(18) представлено на рис. 3.1:

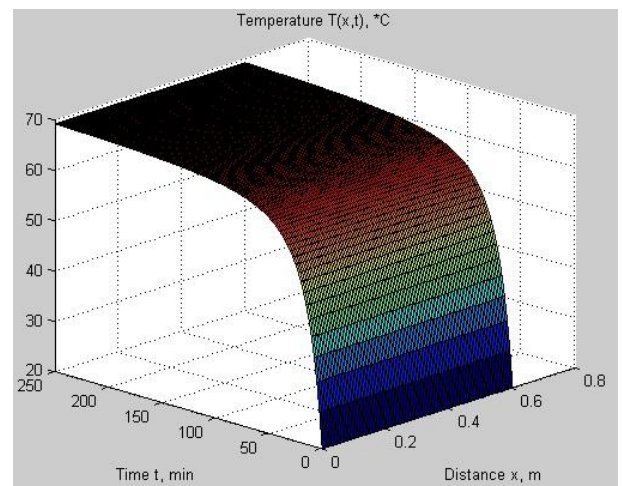
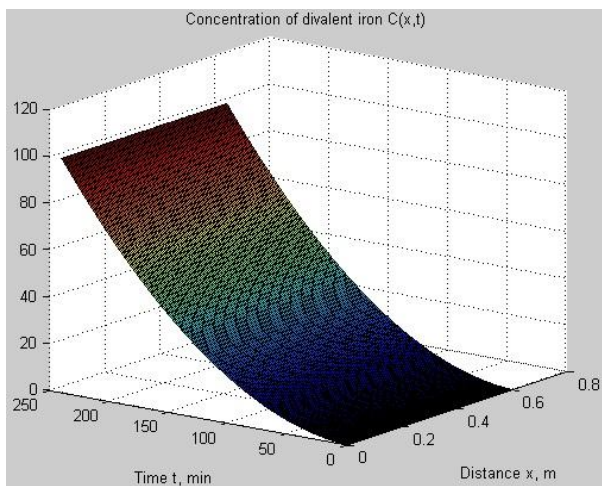


а)



б)

Рис. 3.1. Розподіл: а) концентрації двовалентного заліза з часом на виході з коагулятора; б) температури води з часом



а)

б)

Рис. 3.2. Просторовий розподіл: а) концентрації двовалентного заліза в електролізері; б) температури води в електрокоагуляторі

3.2. Оптимізація процесу електрокоагуляційної очистки

Для оптимізації процесу електрокоагуляційної очистки використаємо модельну задачу процесу очищення стічних вод від забруднення (22). Особливостями такої постановки проблеми є те, що в системі рівнянь (22) враховано процеси, що проходять в електрокоагуляторі, 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 електрокоагуляторі, конструктивних параметрів коагулятора.

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = \frac{L}{V} (C_{in} - C) - (a_0 + a_1 T + a_2 C + a_3 I); \\ \tau \frac{dT}{dt} = \frac{(a_0 + a_1 T + a_2 C + a_3 I) V H}{KS} - (T - T_z) - \frac{c \rho L (T - T_{in})}{KS}. \end{cases} \quad (22)$$

$$C = C_0, T = T_0. \quad (23)$$

Розв'язок системи (22) за умов (23) знайдено за допомогою пакету Simulink. Даний пакет також дозволяє проводити оптимізаційні налаштування.

4. Експерименти

4.1. Дослідження процесу електрокоагуляційного очищення

Для зображення результатів системи рівнянь модельної задачі (імітаційну модель розповсюдження температури та концентрації в електрокоагуляційній установці) використовуємо програмне середовище Matlab та його програмний додаток FeaTool Multiphysics.

Для дослідження впливу сили струму на концентрацію двовалентного заліза використовуємо результати імітаційного моделювання на основі задачі (16)-(18). При цьому всі параметри моделі такі як: величина прикладеної напруги, конструктивні розміри електрокоагулятора, характеристики води, час моделювання залишили сталими. Мінючи силу струму отримали різні результати зміни температури води та концентрації двовалентного заліза. Отримані результати представлено на рис. 4.1.

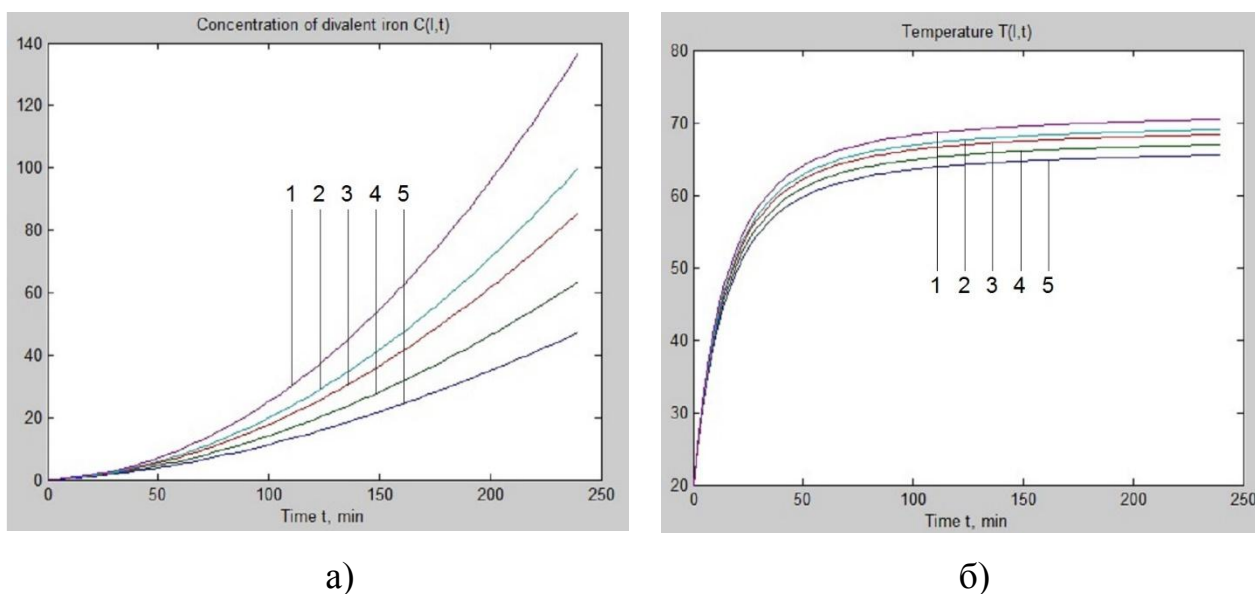


Рис. 4.1. Зміна концентрації двовалентного заліза при силі струму 1 – 72 А; 2 – 70 А; 3 – 69 А; 4 – 67 А; 5 – 65 А; а) та зміна відповідної температури води з часом на виході з електрокоагулятора б)

Використовуючи програмне середовище Matlab та його програмний додаток FeaTool Multiphysics промодельюємо та побудуємо графіки

розповсюдження температури в електрокоагуляційній установці при різних значеннях часу

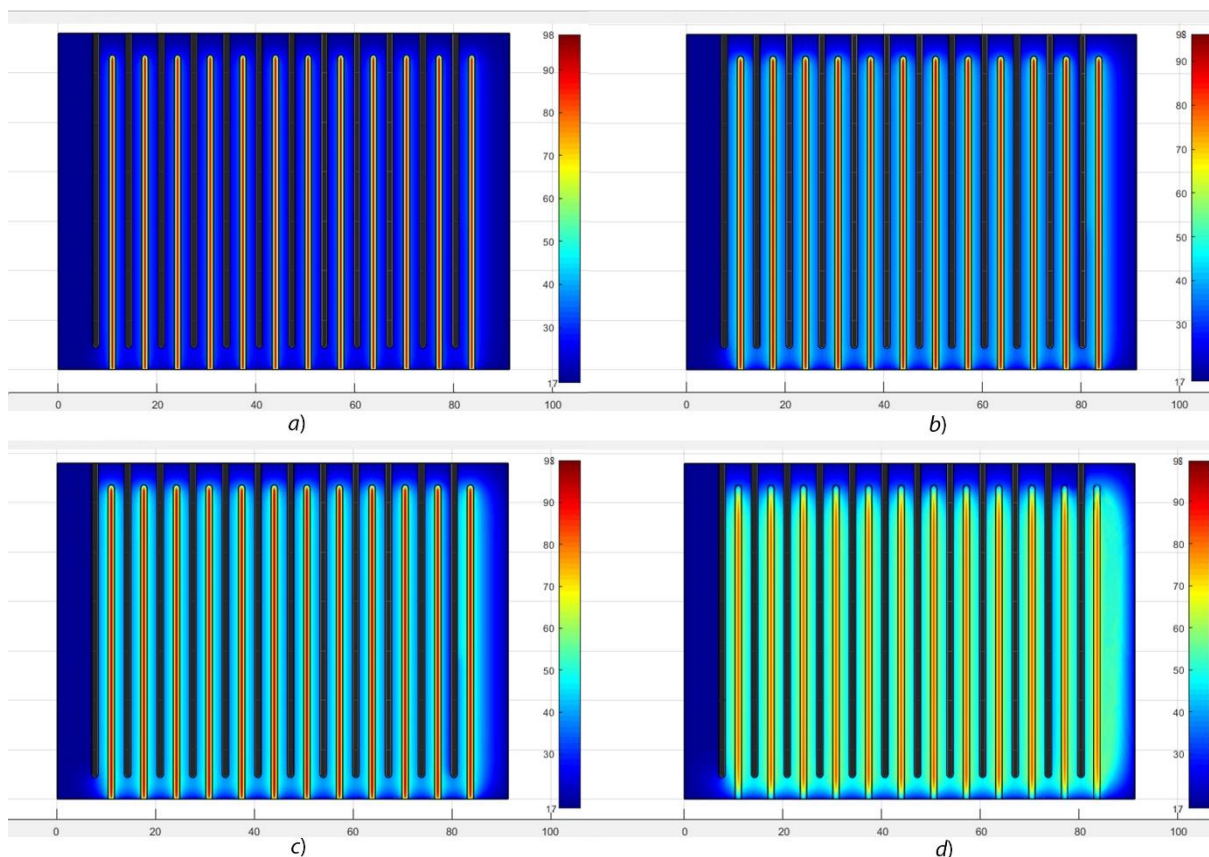


Рис. 4.2. Розповсюдження температури в електрокоагуляційній установці в момент часу:

a) $t=60\text{хв}$, b) $t=120\text{хв}$, c) $t=180\text{хв}$, d) $t=240\text{хв}$

Побудувавши графіки розв'язків системи рівнянь імітаційної моделі розповсюдження температури в електрокоагуляційній установці ми бачимо (рис. 4.2. a)), що в момент часу $t=60\text{ хв}$ вода в даній установці нагрівається до температури $T=40^{\circ}\text{C}$. Збільшуючи час моделювання (рис. 4.2. b) та рис. 4.2. c)) збільшується температура води в електрокоагуляторі $T=50^{\circ}\text{C}$ та $T=60^{\circ}\text{C}$ відповідно. Проводячи моделювання далі, бачимо, що при $t=240\text{ хв}$ (рис. 4.2. d)) вода нагрівається до температури, яка становить $T=70^{\circ}\text{C}$.

А також далі побудуємо графіки руху концентрації в електрокоагуляційній установці при різних значення часу:

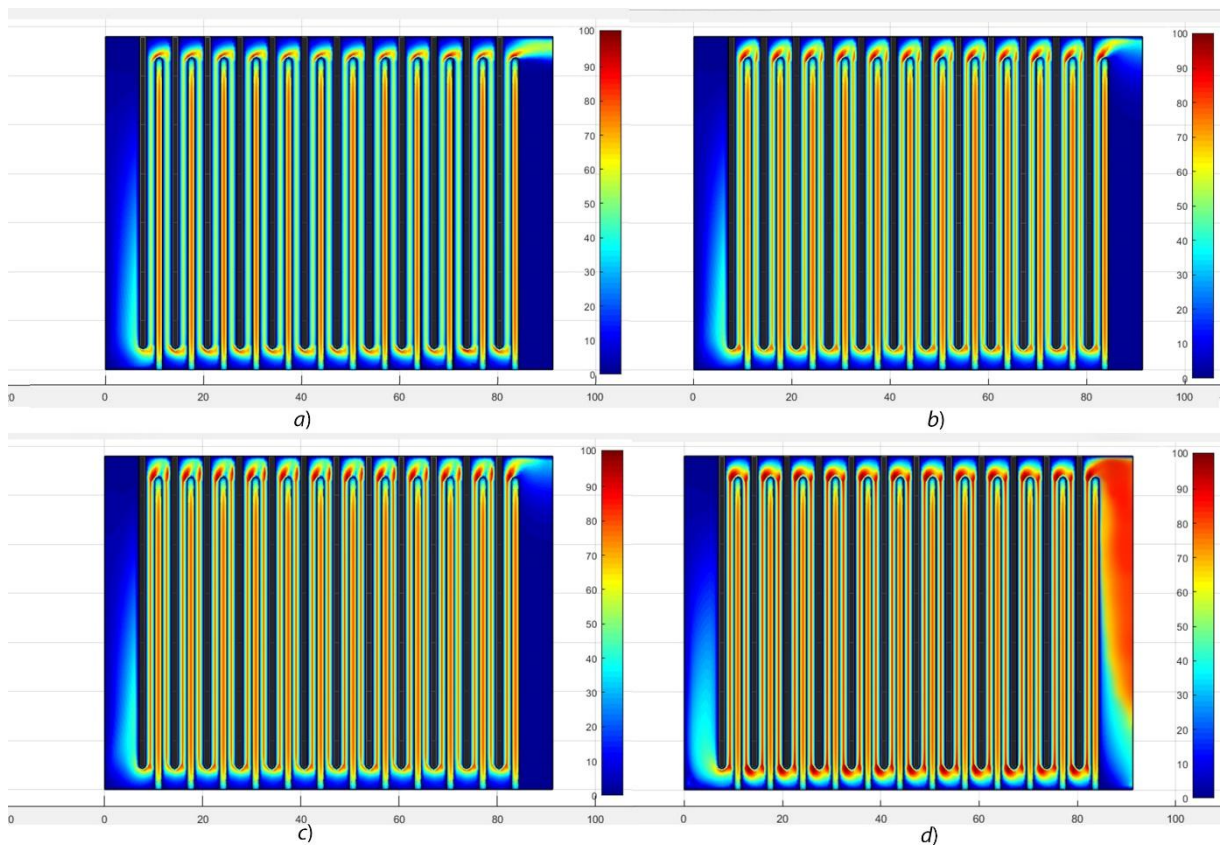


Рис. 4.3. Рух концентрації в електрокоагуляційній установці в момент часу: а) $t=60\text{хв}$; б) $t=120\text{хв}$; в) $t=180\text{хв}$; г) $t=240\text{хв}$

Побудувавши графіки руху концентрації в електрокоагуляційній установці при різних значення часу ми проспостерігали, що в момент часу $t=60\text{хв}$ (рис. 4.3. а)) концентрація досягає значення $C=50\text{ кг/м}^3$. Проводячи моделювання далі на рис. 4.3. б) та на рис. 4.3. в) чітко видно, що значення концентрації збільшується зі збільшення моменту часу t , але не досягає потрібного значення. Проводячи моделювання далі рис. 4.3. г) (момент часу $t=240\text{хв}$) можна зробити висновок, що саме в даному випадку концентрація досягає необхідного значення $C=100\text{ кг/м}^3$.

Також дану імітаційну модель, але в спрощеному трактуванні, можна використовувати в моделюванні автоматизованого технологічного процесу керування очищенням стічних вод.

4.2. Оптимізація та керування процесом електрокоагуляційної очистки

Розв'язок системи (22) за умов (23) знайдено в пакеті Simulink (рис. 4.4.). До вхідних параметрів даної моделі відносяться: концентрація забруднення на вході в електролізер, об'ємна витрата рідини, об'єм робочої зони електрокоагулятора, 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 електрокоагулятора.

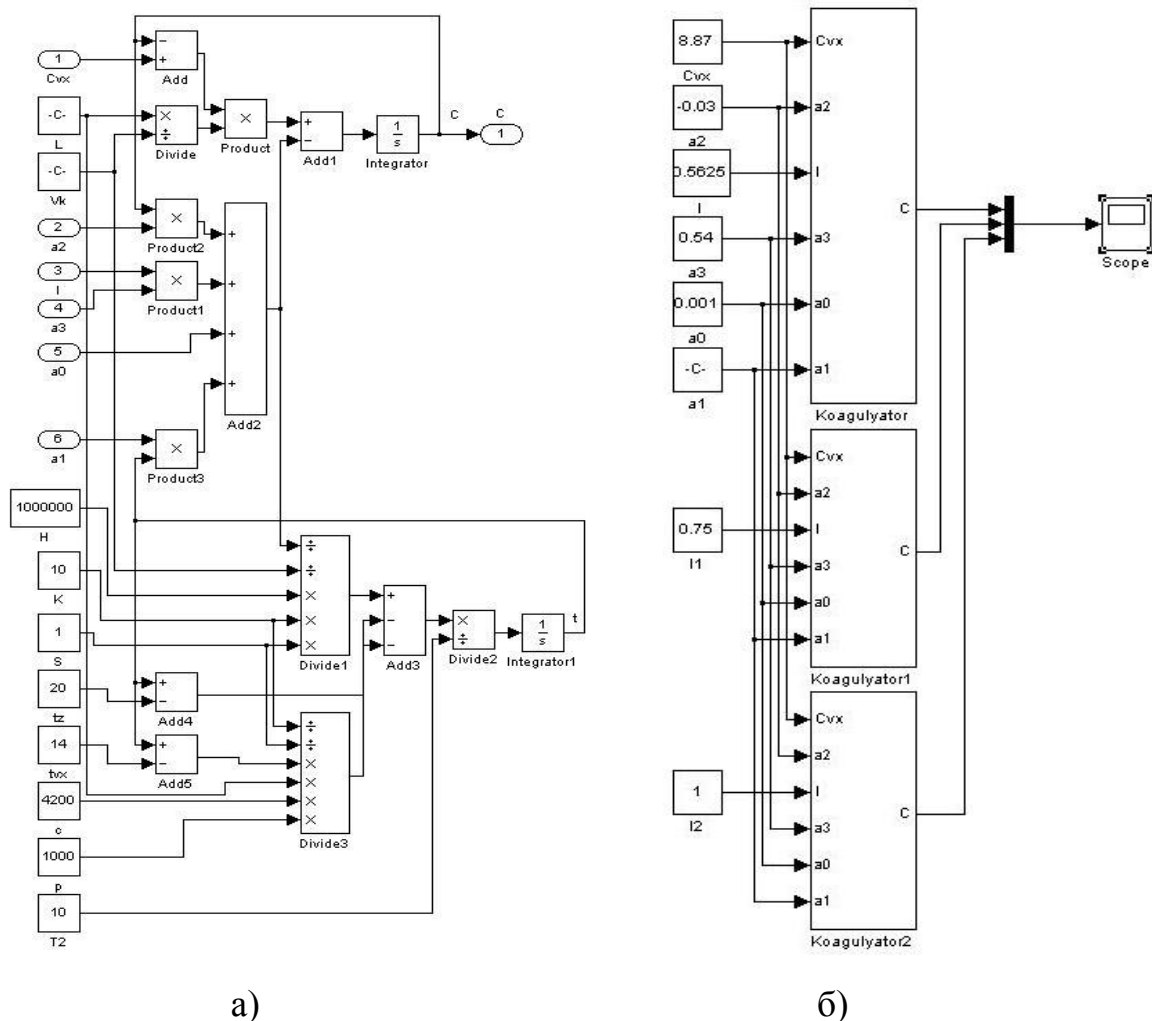


Рис. 4.4. – Simulink модель роботи електрокоагулятора а) та Simulink модель дослідження впливу сили струму на концентрацію забруднення цільового компонента на виході з електрокоагулятора б)

Для дослідження впливу зміни величини струму на якість очищення стічних вод розроблено модель, яка складається з 3 реакторів в яких всі вхідні дані є спільними крім густини струму. Для кращої наочності отриманих результатів всі графіки побудовані в одній координатній площині.

Для підтвердження адекватності моделі використаємо експериментальні дані з [20], що представлені в таблиці 4.1. Використавши стандартні засоби побудови графіків Matlab розмістимо результати моделювання з даними експерименту за однакових вихідних даних і порівняємо.

Таблиця 4.1
Вихідні дані експерименту

Час, хв	Густина струму i , А/м ²		
	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

Шляхом комп'ютерного моделювання за наведеними вхідними даними:

$$C_{in}|_{\tau=0} = 8,87 \text{ мг/л}, \quad t|_{\tau=0} = 18^\circ\text{C}, \quad L = 0,006 \text{ м}^3/\text{с}, \quad V = 0,03125 \text{ м}^3,$$

$$H = 1 \text{ МДж/г}\cdot\text{с}, \quad K = 10 \text{ Вт/м}^2\cdot^\circ\text{C}, \quad S = 1 \text{ м}^2, \quad t_s = 20^\circ\text{C}, \quad t_{in} = 14^\circ\text{C},$$

$$c = 4200 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}, \quad \rho = 1000 \text{ кг/м}^3, \quad T_2 = 10, \quad a_0 = 0,001, \quad a_1 = 0,000007,$$

$$a_2 = -0,03, \quad a_3 = 0,54 \text{ - отримали такі результати (рис. 4.5.):}$$

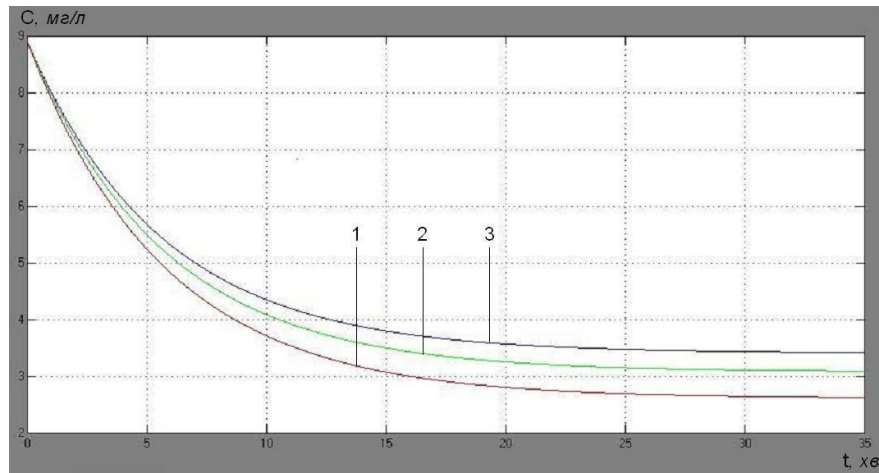


Рис. 4.5. – Зміна концентрації забруднення іонами нікелю на виході з коагулятора з часом при силі струму $I = 0,5625 \text{ A}$ - крива 3, $I_1 = 0,75 \text{ A}$ - крива 2, $I_2 = 1 \text{ A}$ - крива 1

Використавши експериментальні дані з таблиці 4.1 та результати моделювання системи при різній величині струму з допомогою стандартних засобів Matlab побудували отримані результати на сітці дослідних даних для наочності відображення точності моделі.

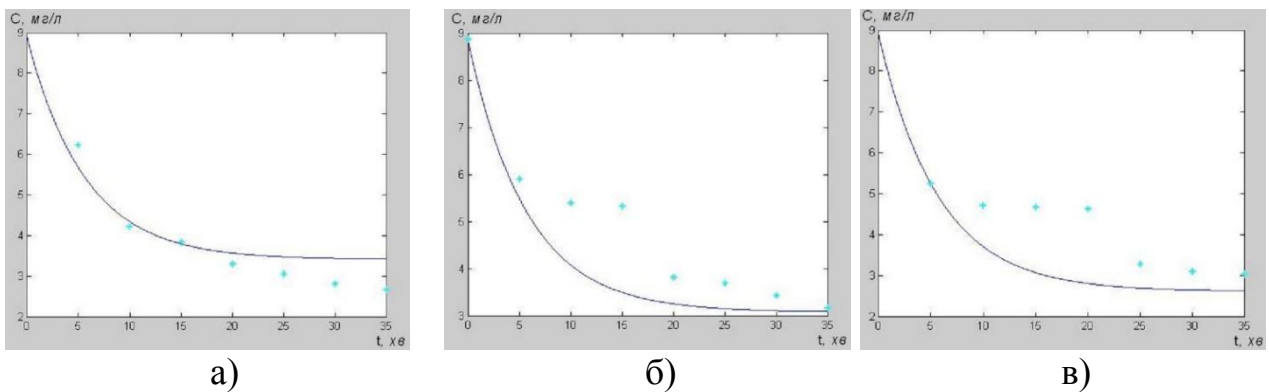


Рис. 4.6 – Зміна концентрації забруднення від часу при густині струму $I = 9 \text{ A/m}^2$ - а), $I = 12 \text{ A/m}^2$ - б) та $I = 16 \text{ A/m}^2$ - в)

Таблиця 4.2
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
10	30	3,421

На основі розробленої моделі 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 таблиці 4.1 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 таблиці 4.2.

З допомогою програми Matlab проведено апроксимацію отриманих даних для отримання коефіцієнтів поліноміального ряду. При цьому використовували функцію polyfit та написали наступний програмний код:

```
>> 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 (24) та виступає в системі як П-регулятор.

$$I=0,1265*C_{vx}-0,3738. \quad (24)$$

Для перевірки роботи регулятора розроблено імітаційну модель, що представлена на рис 4.7., яка складається з двох субсистем “Regulyator” рис 4.8., “Koagulyator” рис 4.4.

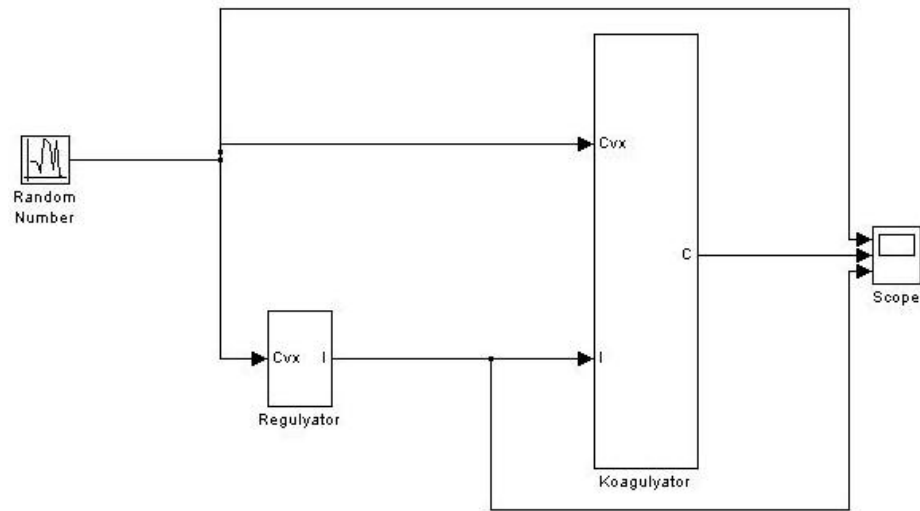


Рис. 4.7. Імітаційна модель для перевірки роботи системи

В підсистемі “Regulator” реалізовано залежність (24), 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.

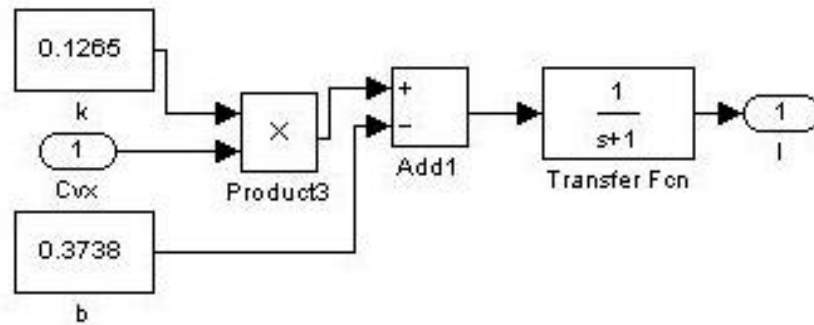


Рис. 4.8 – Імітаційна модель регулятора

Після проведення моделювання отримано результати які представлено на рис 4.9., де в якості вхідної концентрації забруднення використано випадковий сигнал, що формується блоком «Random number»(рис 4.9).

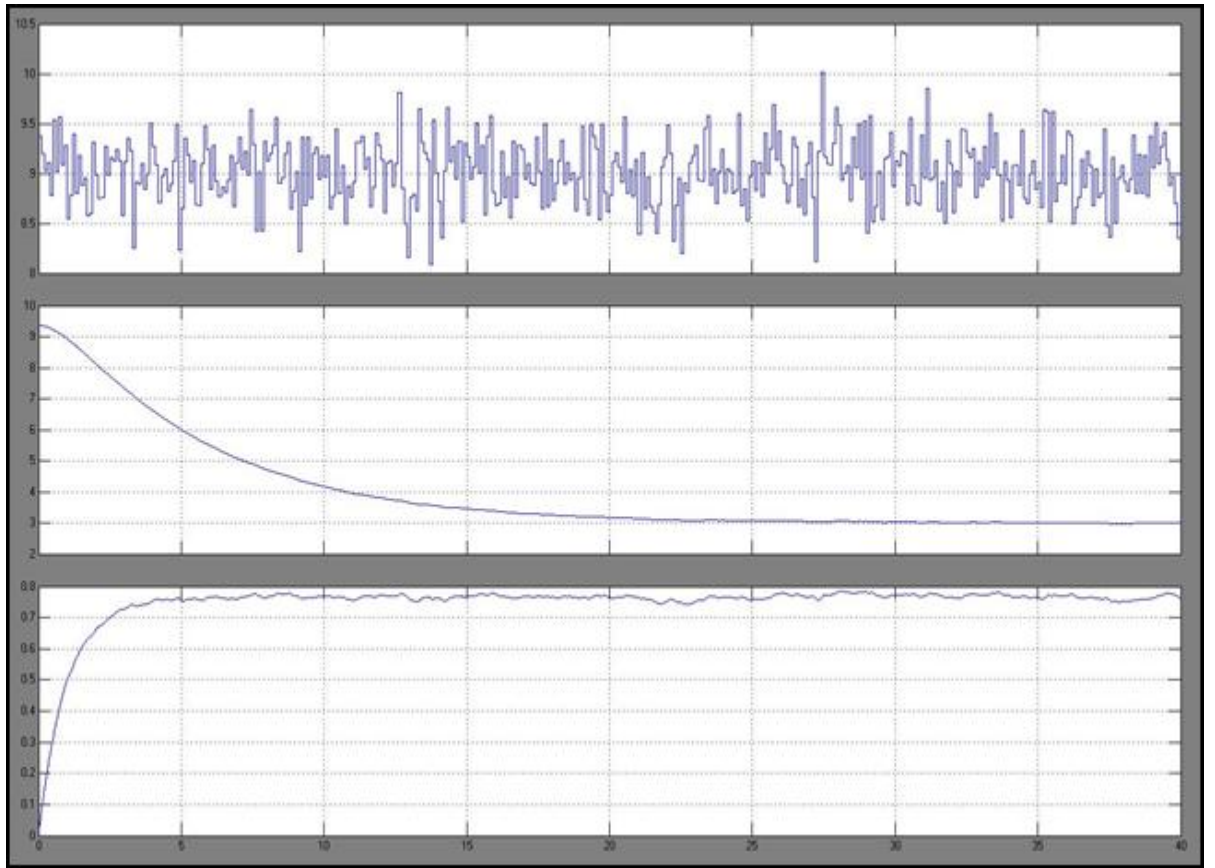


Рис. 4.9. Результати проведення моделювання

5. Програмна реалізація процесу електрокоагуляційного очищення

Отримані теоретичні результати та розроблена модель є основою для розробки автоматизованої системи процесу електрокоагуляційного очищення.

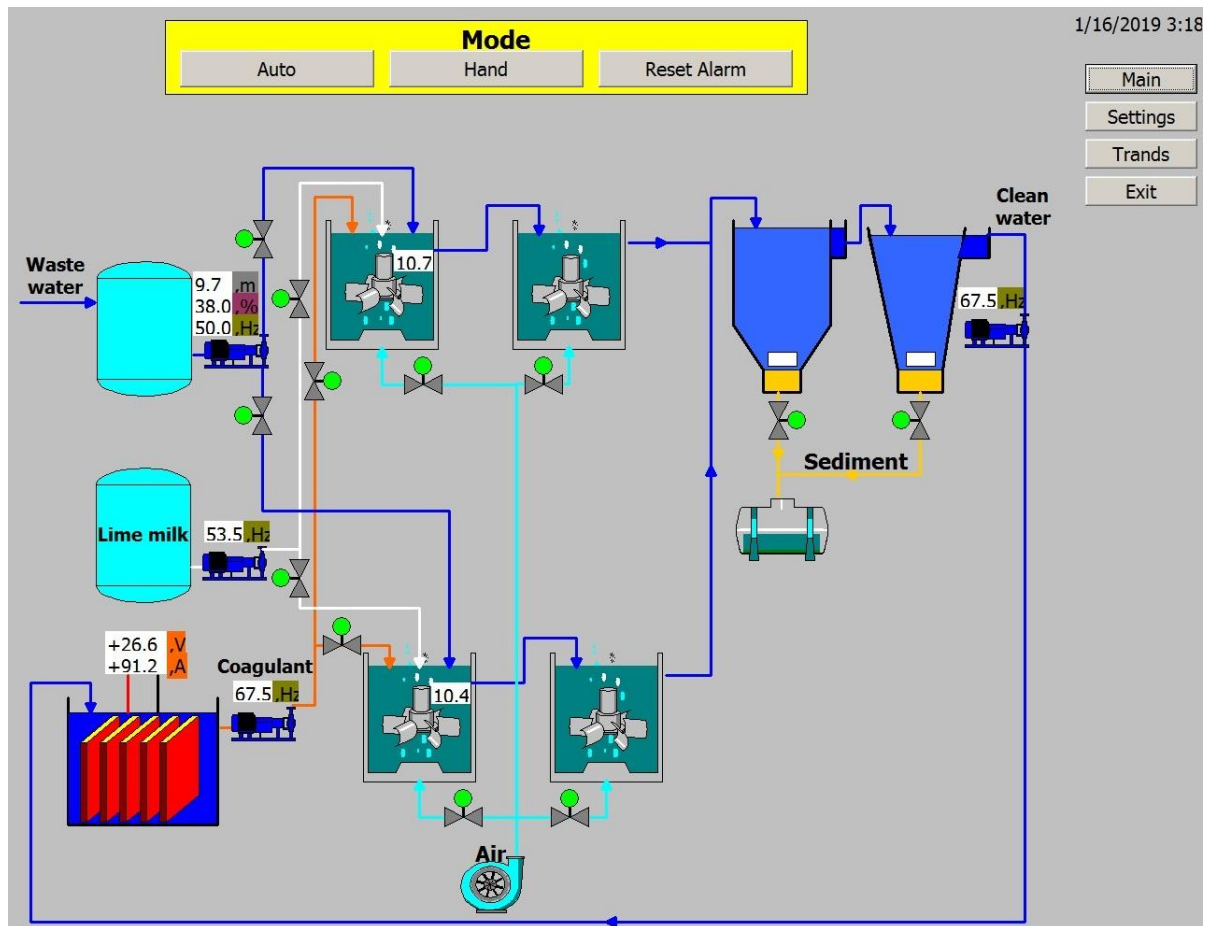


Рис. 5.1. Мнемосхема процесу для керування процесом очистки вод

1/16/2019 3:28

Pump speed	Auto mode	Hand mode	Real speed, Hz
Waster water	50	25	50
Lime milk	52	25	52
Coagulant	67	25	67
Clean water	50	25	49

	1 reactor first step	2 reactor first step
pH	10	10
Real pH	10	10

	Primary tank	Secondary septic tank
Cleaning time	75	75

Main Settings Trands Exit

Рис. 5.2. Вікно «Settings» візуалізації процесу

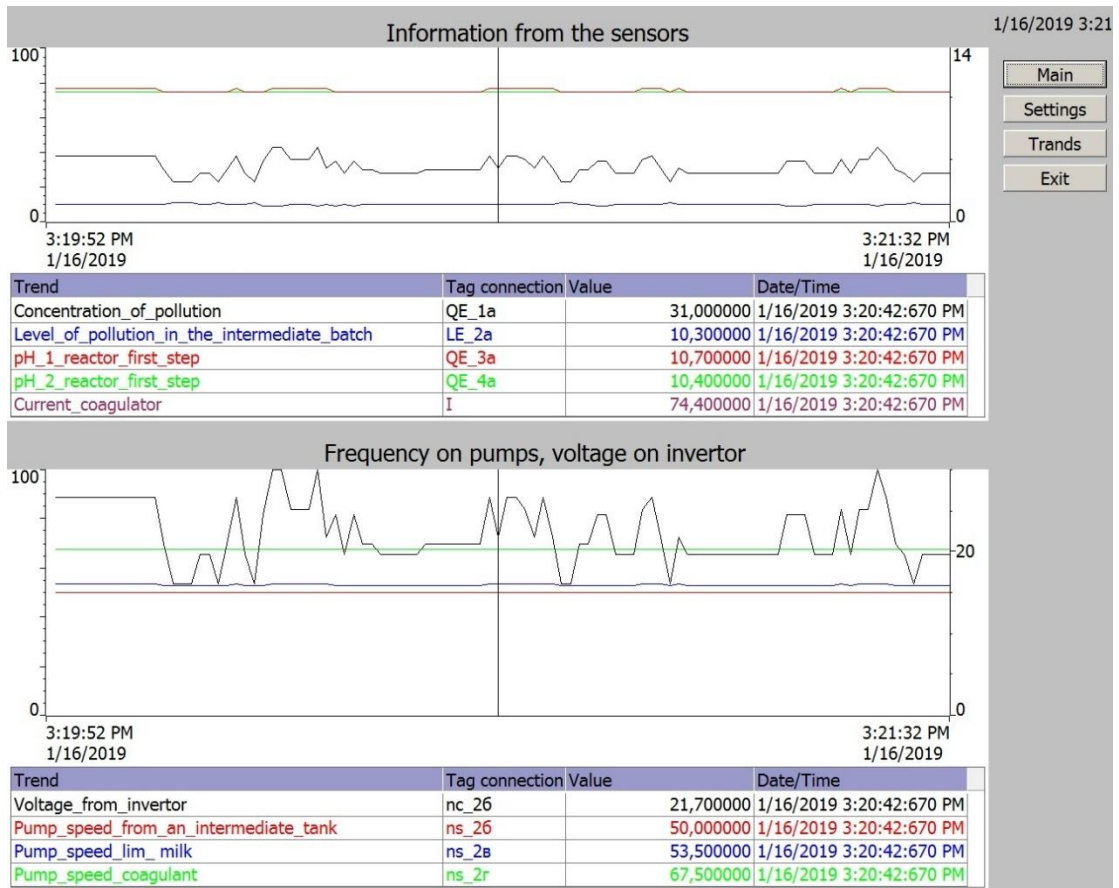
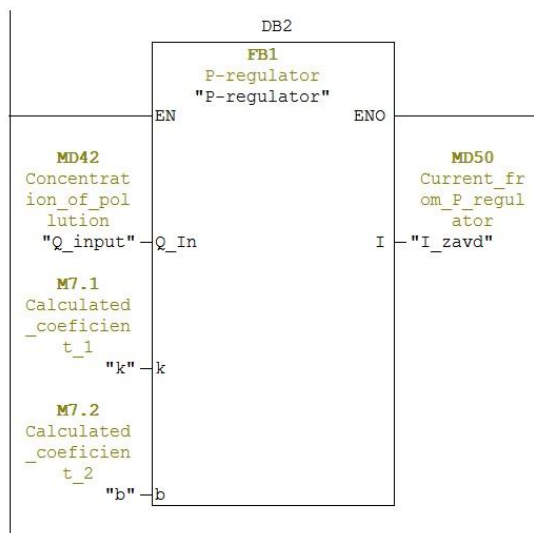


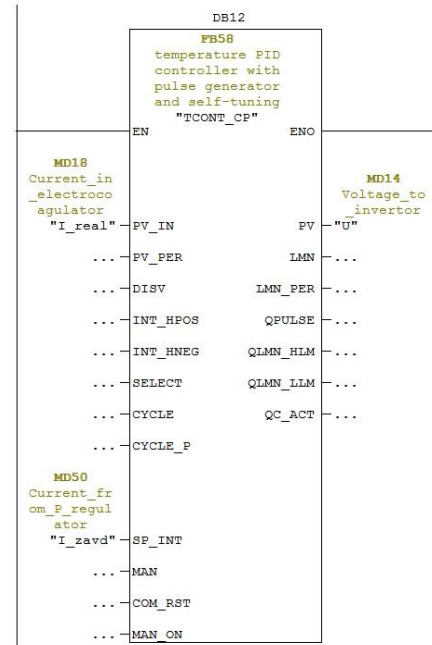
Рис. 5.3. Вікно «Trands» візуалізації процесу

Network 13: Title:



а)

Network 12: Title:



б)

Рис.5.4. Програма керування з адресацією: а) розроблений П-регулятор; б) стандартний ПІД регулятор

Розроблена система візуалізації для керування процесом електрокоагуляції. До основних її функцій можна віднести: відображення роботи всіх об'єктів в режимі реального часу, два режими роботи системи, наявність ряду параметрів для керування продуктивністю установки, відображення та архівування даних про аналогові сигнали.

На рис. 5.4. а) показано реалізований алгоритм визначення достатньої сили струму між пластинами залежно від вхідної концентрації забруднення у стічних водах. До вхідних параметрів функціонального блока також входять два коефіцієнти, які визначаються шляхом моделювання.

Щоб забезпечити отриману силу струму використовується інший контур регулювання з використанням стандартного ПД-регулятора, як показано на рис. 5.4. б).

Висновок

Побудовано математичну модель, що описує закономірності протікання процесів тепло- та масообміну в електрокоагуляційній установці, отримання двовалентного заліза від прикладеної сили струму та геометричних розмірів електрокоагулятора. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням асимптотичного наближення розв'язку відповідної крайової задачі та наведені результати розрахунків розподілу концентрації заліза та температури води в електрокоагуляторі, а також на виході з коагулятора в залежності від сили струму. Розв'язана відповідна модельна задача з використанням функції `pde` середовища MatLab. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації коагулянту з часом на виході з коагулятора при зміні прикладеної сили струму (рис. 4.1.). Наведене графічне дослідження розповсюдження концентрації (рис. 4.3.) та температури (рис. 4.2.) в установці в певні моменти часу при заданій силі струму за допомогою додатку `FeaTool Multiphysics` середовища MatLab.

Показано адекватність розробленої математичної моделі.

Розроблена система візуалізації для керування процесом представлена на рис. 5.1.

Запропонована методологія розрахунку розподілу концентрації використовується для аналізу впливу тепло- та масопереносу в електроліті та кінетику реакції на електродах, а також як основа для експериментально-теоретичних досліджень оптимізації та автоматизації процесу утворення коагулянту методом електрокоагуляції.

Список літератури

1. Safonyk A. Development of an automated decision support system for the process of biological wastewater treatment / A. Safonyk, I. Targoniy, A. Bomba // Computer Science and Information Technologies: Proceedings of the XII International Scientific and technical Conference CSIT 2017. Volume 1. - Львів: Видавництво "Вежа і Ко", 2017. - P. 71-75.
2. Bomba A. Mathematical Modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by using microporous particles / A. Bomba, Yu. Klymiuk, I. Prysiashniuk, O. Prysiashniuk, A. Safonyk // AIP Conf. Proc. 1773, 040003 (2016).
3. A. Ya. Bomba. Mathematical simulation of the process of aerobic treatment of wastewater under conditions of diffusion and mass transfer perturbations / A. Ya. Bomba, A. P. Safonik // Journal of Engineering Physics and Thermophysics, Vol. 91, No. 2, March, 2018, pp. 318-323
4. Versteeg HK, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. New York, USA: Pearson Education, 2007.
5. Safonyk A. Mathematical modelling of regeneration the filtering media bed of granular filters / Andrii Safonyk, Sergiy Martynov, Sergiy Kunytsky, Oleg Pinchuk // Advances in Modelling and Analysis C Vol. 73, No. 2, June, 2018, pp. 72-78. DOI: 10.18280/ama_c.730206
6. Enciso R, Padilla L, Ojeda C, Delgadillo J, Rodriguez I. Computational fluid dynamics characterization of a rotating cylinder electrochemical reactor using an RANS-RNG turbulence model. Int J Electrochem Sci 2012; 7: 12181-12192.
7. Kulinchenko V.R. Tkachenko S. I. Teploperedacha z elementamy masoobminu (teoriia i praktyka protsesu) Feniks, Kyiv, 2014. 917 c.
8. Naje A.S., Chelliapan S., Zakaria Z., Ajeel M.A., Alaba P.A., A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater, Rev. Chem. Eng. 33, 2017. Pp. 263-292.
9. Alam R, Shang J. Electrochemical model of electro-flotation // Journal of

Water Process Engineering, 12, 2016. Pp. 78-88.

10. Safonyk A. Research and automation of the process of wastewater treatment electrocoagulation / Andrii Safonyk, Ivan Targoniy, Martyniuk Yuriy, Andrii Bomba // Computer Science and Information Technologies: Proceedings of the XIII International Scientific and technical Conference CSIT 2018. Volume 1. - Львів: Видавництво "Вежа і Ко", 2018. - Pp. 84-88.

11. Fukui, Y., Yuu, S. Collection of submicron particles in electro-flotation. Chemical Engineering Science, 35(5), 1980. Pp.1097-1105.

12. Safonyk A., Bomba A., Tarhonii I. Modeling and automation of the electrocoagulation process in water treatment // Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 871, 2019, pp 451-463.

13. Rajwant Kaur, Amit Arora Amandeep Kaur Narendra singh Sangeeta sharma. (2018). Treatment of waste water through electrocoagulation. Pollution Research Vol 37(Issue 2):394-403

14. Bomba A. Spatial modeling of multicomponent pollution removal for liquid treatment under identification of mass transfer coefficient / Bomba A., Safonyk A., Voloshchuk V. // Mathematical Modeling and Computing, Vol. 5, No. 2, 2018, 108-118.

15. Smoczyński, L., Muńska, K. T., Kosobucka, M., Pierożyński, B., Wardzyńska, R., & Załęska-Chróst, B. (2014). Destabilization of model wastewater in the chemical coagulation process. Ecological Chemistry and Engineering, 21(2), 269-279. (in Eng.).

16. Martynov S., Fylypchuk V., Zoshchuk V., Kunytskyi S., Safonyk A., Pinchuk O. Technological model of water contact iron removal. Journal of Water and Land Development. No. 39 p. 2018, 93–99.

17. A. P. Safonyk, O. O. Hrytsyna, V. A. Voloshchuk, V. V. Sereda. Mathematical modelling of heat and mass transfer processes in wastewater biological treatment systems. Proceedings of the International Symposium on “Power and Chemical Engineering”, June 29– July 02, 2018. – Sofia, Bulgaria, 2018. – Pp. 106-112.

Анотація наукової роботи під шифром “Електрокоагулятор”

Актуальність роботи. В процесах очистки стічних вод широко застосовують метод, який пов'язаний з накладанням електричного поля – електрокоагуляція. На сьогодні, велика кількість наукових досліджень присвячена моделюванню електрокоагуляційної очистки стічних вод. Було досліджено вплив різних параметрів, таких як матеріал електрода, відстань між електродами, щільність струму, а також концентрація забруднюючих речовин на ефективність процесу електрокоагуляції. 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. Проте запропоновані математичні моделі переважно не описують кінетику процесу всередині електрокоагулятора, або не враховують ряд параметрів, наприклад вплив зміни температури води на швидкість протікання електрокоагуляційного процесу. Враховуючи вище сказане сформульовано мету роботи.

Мета роботи. Розробити імітаційну модель отримання коагулянту для освітлення та знебарвлення промислових стічних вод, яка враховує процеси, що протікають в електрокоагуляторі. Дослідити вплив сили струму на зміну концентрації коагулянту та температури води. На основі результатів даної імітаційної моделі дослідити процес зворотного впливу характеристик середовища на характеристики процесу. Показати вплив сили струму на концентрацію та температуру речовини.

Завдання роботи. Створити математичну модель електрокоагуляційної обробки, яка враховує процес утворення заліза із розчину електроліта, вплив технічних характеристик (сила струму, швидкість потоку, вхідна концентрація зважених частинок, температура) на кінетику процесу масо- та теплоперенесення в електрокоагуляторі, а також дослідження впливу зазначених параметрів на ефективність утворення шламу. Повести імітаційне моделювання використовуючи розроблену математичну модель.

Новизна роботи. Моделювання процесів виконано на основі рівнянь з використанням асимптотичного наближення розв'язку відповідної крайової задачі, що описують рух нестисливої рідини між електродами враховуючи кінетику процесу всередині електрокоагулятора та ряд параметрів, що залежать від впливу зміни температури води на швидкість протікання електрокоагуляційного процесу.

Цінність отриманих результатів. Запропонована математична модель розрахунку розподілу концентрації використовується для аналізу впливу тепло- та масоперенесення в електроліті та кінетику реакції на електродах, а також як основа для експериментально-теоретичних досліджень оптимізації та автоматизації процесу утворення коагулянту методом електрокоагуляції.

Резюме наукової роботи під шифром “Електрокоагулятор”

З метою ефективного процесу водопідготовки розроблено математичну модель отримання коагулянту для освітлення та знебарвлення промислових стічних вод, яка враховує процеси, що протікають в електрокоагуляторі. Побудовано математичну модель, що описує закономірності протікання процесів тепло- та масообміну в електрокоагуляційній установці, отримання двовалентного заліза від прикладеної сили струму та геометричних розмірів електрокоагуляторів. Знайдено розв’язок відповідної модельної задачі з використанням асимптотичного наближення розв’язку відповідної крайової задачі та наведені результати розрахунків розподілу концентрації заліза та температури води в електрокоагуляторі, а також на виході з коагулятора в залежності від сили струму. Досліджено вплив сили струму на зміну концентрації коагулянту та температури води. На основі результатів даної імітаційної моделі досліджено процес зворотного впливу характеристик середовища на характеристики процесу. Показано вплив сили струму на концентрацію та температуру речовини. Розроблено систему візуалізації для керування процесом електрокоагуляції

Робота складається з номенклатури, вступу, основного тексту, висновків та списку літератури; викладена на 34 сторінках друкованого тексту (2 сторінки номенклатура, 2 сторінки література), містить 17 рисунків, 3 таблиці та 17 - посилань на роботи вітчизняних та зарубіжних авторів.

Ключові слова: математичне моделювання, електрокоагулятор, імітаційна модель, коагулянт, концентрація, температура, сила струму.