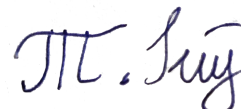


Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування

Таргоній Іван Миколайович



УДК 519.63: 681.516.75

**МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
ОЧИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОДИ ДЛЯ ЇХ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Рівне – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України, м. Рівне.

Науковий керівник: **Сафоник Андрій Петрович**,
доктор технічних наук, професор
Національний університет водного
господарства та природокористування,
професор кафедри автоматизації, електротехнічних та
комп'ютерно-інтегрованих технологій
м. Рівне.

Офіційні опоненти: **Журавчак Любов Михайлівна**
доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Національний університет «Львівська політехніка»,
професор кафедри програмного забезпечення;

Волощук Володимир Анатолійович
доктор технічних наук, доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
завідувач кафедри автоматизації
теплоенергетичних процесів.

Захист дисертації відбудеться 9 жовтня 2020 року о 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 47.104.09 в Національному університеті водного господарства та природокористування Міністерства освіти і науки України за адресою: 33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету водного господарства та природокористування за адресою: 33017, м. Рівне, вул. Олекси Новака, 75.

Автореферат розісланий 28 серпня 2020 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О. Р. Мічута

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Відсутність очисних споруд або їх використання після відпрацювання свого ресурсу несе згубний вплив природним екосистемам. Для екологічної безпеки одним з першочергових завдань є розроблення сучасних систем водоочищення або вдосконалення режимів роботи існуючих систем шляхом їх автоматизації. Оскільки залежно від типу промисловості змінюються склад і концентрації забруднюючих речовин, не існує єдиного універсального методу очищення технологічних вод. У більшості випадків технологічні води містять комплексні забруднення, які необхідно очищати до заданих показників якості. Показники якості технологічної води на сьогоднішній день в основному забезпечуються в ручному режимі. Використання існуючих аналізаторів базується на дослідних вимірах, що потребує постійного залучення персоналу та проведення відповідного лабораторного дослідження. Механізмів автоматизації процесів очищення внаслідок незначної кількості пристроїв, які б забезпечували таку можливість, є небагато. Окрім того, вартість таких пристроїв є високою, а їх обслуговування потребує спеціалістів високої кваліфікації. На сьогоднішній день є мало розробленими, безсистемними або взагалі відсутніми модельні механізми, які б надали можливість розробити програмні комплекси для автоматизації процесів очищення технологічних вод. Ключовим інструментом при розробці таких систем є використання математичного моделювання процесів очищення технологічної води.

Більшість існуючих робіт за вказаною проблематикою присвячені розробці алгоритмів автоматизованого керування технологічними процесами очистки технологічних вод на основі експериментальних даних. У той же час важливою є також розробка математичних моделей, що адекватно описують відповідні процеси.

Через недосконалість існуючих математичних моделей процесів очищення технологічних вод (прогнозування, керування та оперативних методів контролю), багато відповідних характерних параметрів не враховуються або задаються довільно, що унеможливує їх використання для розробки програмних комплексів автоматизації відповідних процесів.

Наведені недоліки потребують вирішення, оскільки очищенню підлягають великі об'єми технологічних вод, а недостатнє їх очищення має згубний вплив на водні екосистеми. Крім того, відносно висока вартість процесів очищення може бути зменшена шляхом оптимізації витрат на енергоресурси.

Таким чином, актуальною є *науково-прикладна задача вдосконалення режимів роботи очисних споруд шляхом їх автоматизації на основі розроблених нових та удосконалених існуючих математичних моделей процесів очищення технологічних вод*, що, зважаючи на величезні обсяги технологічних вод, які підлягають очищенню, а також потреби людства у воді заданої якості, забезпечить відповідні показники якості та вдосконалим механізми очистки технологічних вод.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертаційної роботи отримані в рамках науково-дослідних тем, в яких здобувач був виконавцем: «Дослідження та обґрунтування базових параметрів процесу осадження феромагнітних домішок в поліградієнтних фільтруючих загрузках» (№ держ. реєстр. 0114U001139); «Дослідження і удосконалення базових параметрів апаратів магнітного осадження феромагнітних продуктів корозії теплоенергетичного

обладнання» (№ держ. реєстр. 0114U001615); «Розвиток методів комплексного аналізу і теорії збурень моделювання нелінійних процесів з керуванням, ідентифікацією та оптимізацією» (№ держ. реєстр. 0116U000711); «Інноваційні засади проектування та адаптації ресурсозберігаючих рішень для оптимізації процесів очищення води з урахуванням автоматизованого контролю» (№ держ. реєстр. 0119U000083). У рамках виконання цих науково-дослідних робіт автором проведено: математичне та комп'ютерне моделювання процесів очищення технологічних вод, дослідження впливу основних параметрів процесу на якість очистки, розроблення систем автоматизації відповідних процесів.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вдосконалення режимів роботи очисних споруд шляхом їх автоматизації на основі розроблення нових та удосконалення існуючих математичних моделей процесів очищення технологічних вод.

Для досягнення поставленої мети ставились наступні задачі дослідження:

- розробити модель процесу очищення технологічної води у зернистому намагніченому фільтруючому матеріалі, виконати аналіз параметрів моделі, розробити систему автоматизації процесу постійного очищення води від магнітних домішок;

- розробити математичні моделі процесів очищення технологічних вод від домішок шляхом фільтрування для випадку біологічного очищення при врахуванні зворотного впливу характеристик процесу (концентрації забруднення рідини, осаду, кисню, температури води) на параметри середовища (коефіцієнти дифузії, масообміну тощо);

- розробити модель електрокоагулятора та дослідити вплив вольт-амперної характеристики на параметри середовища;

- на основі побудованих математичних моделей розробити програмний комплекс для автоматизації процесів очищення технологічних вод від забруднення з мінімальними енергозатратами.

Об'єкт дослідження – процеси очищення технологічних вод.

Предмет дослідження – математичні моделі процесів очищення технологічних вод від забруднення для їх автоматизації.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано методи математичної фізики та гідродинаміки при побудові математичних моделей процесів очищення технологічних вод, числово-асимптотичні та аналітичні методи розв'язування відповідних модельних задач. Для створення програмного забезпечення використано методи об'єктно-орієнтованого програмування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- узагальнено математичну модель процесу очищення технологічних водних середовищ у зернистому намагніченому фільтруючому матеріалі, що дозволяє визначити час захисної дії фільтра; виконано математичний аналіз параметрів і моделі процесу магнітного осадження домішок; розроблено систему автоматизації процесу постійного очищення води від магнітних домішок, яка забезпечує нормативні показники якості;

- вперше побудовано математичну модель процесу біологічного очищення технологічних вод, яка, на відміну від відомих, враховує взаємодію бактерій, забруднення при зовнішніх чинниках (концентрація кисню, температура рідини і т.д.), а також запропоновано метод розрахунку оптимальної концентрації кисню при заданих параметрах процесу для забезпечення ефективного очищення технологічних вод від забруднення;

- вперше побудовано математичну модель процесу електрокоагуляції, що враховує вплив прикладеної напруги, температури водного середовища, розміри електрокоагулятора, параметри процесу, використання якої дозволяє дослідити вплив вольт-амперної характеристики на параметри середовища при змінній вхідній концентрації забруднення;

- на основі розроблених математичних моделей процесів магнітного, біологічного та електрокоагуляційного очищення рідин від забруднень розроблено програмний комплекс для автоматизації процесів очищення технологічних вод.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані результати моделювання та розроблений програмний комплекс є основою для розв'язання низки прикладних задач, а саме:

- визначення часу захисної дії магнітного фільтра та його регенерації, що забезпечує ефективний режим його роботи;

- визначення оптимальних параметрів процесу очищення технологічних вод;

- розрахунок конструктивних розмірів електрокоагулятора для вироблення заданої концентрації коагулянту при постійній витраті води;

- розроблення прикладних програм для розрахунку процесів очищення;

- розроблення системи автоматизації процесу очищення рідини від домішок, що дозволяє зменшити кількість обслуговуючого персоналу при збільшенні продуктивності роботи очисних споруд.

Результати роботи впроваджено:

- товариством з обмеженою відповідальністю «Е.Т.Е» при проектуванні електрокоагуляційних установок для очистки технологічних вод текстильної промисловості;

- Рівненським обласним виробничо-комунальним підприємством водопровідно-каналізаційного господарства «Рівнеоблводоканал» при налаштуванні режимів та автоматизації роботи водопідготовчих установок;

- товариством з обмеженою відповідальністю «Свиспан Лімітед» при оптимізації використання ресурсів існуючої системи біологічного очищення відпрацьованих вод.

Отримані у роботі математичні й комп'ютерні моделі розв'язування нелінійних задач процесів фільтрування, алгоритми та графіки використовуються при читанні курсів «Числові методи», «Числові методи в електроенергетиці» (кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій НУВГП). Запропоновані моделі та алгоритми використовувалися для розв'язання відповідних задач у науково-дослідних лабораторіях: «Процеси і апарати фізико-хімічних методів очистки» та «Робототехніки та керування» НУВГП.

Особистий внесок здобувача. Всі теоретичні та прикладні результати, що складають зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачеві належить: [7] – підбір комплексу технічних засобів автоматизації, вибір контурів регулювання, розробка графічного відображення і програми керування контролера; [8] – розробка П-регулятора та комп'ютерної моделі перевірки його роботи, побудова і опис функціональної схеми біологічного очищення, розробка візуалізації технологічного процесу та реалізація алгоритму керування; [14] – розробка функціональної схеми автоматизації біологічного очищення та обґрунтування вибору контурів регулювання; [5, 21] – знаходження розв'язку модельної задачі, дослідження впливу температури водного середовища і величини струму між пластинами електрокоагулятора на концентрацію забруднення у очищеній воді, розробка алгоритму керування допустимою концентрацією домішок та реалізація у системі автоматизованого керування концентрацією домішок у технологічних водах; [6] – розробка методу знаходження налаштувань розробленого П-регулятора та перевірка адекватності отриманих результатів; [11, 12] – розробка функціональної схеми автоматизації процесу магнітного очищення; [13] – підбір комплексу технічних засобів автоматизації; [10] – проведення розрахунку параметрів магнітного фільтра; [3] – знаходження розв'язку моделі та розробка системи автоматизації магнітного очищення; [9] – опис контуру регулювання магнітного осадження забруднення; [17, 19] – розробка та опис функціональної схеми автоматизації аеробного очищення; [16] – розрахунок розподілу концентрації забруднення; [2] – розробка комп'ютерної моделі електрокоагулятора, дослідження зміни концентрації іонів нікелю від величини струму між пластинами, розробка П-регулятора, реалізація запропонованого алгоритму в програмованому логічному контролері та розробка візуалізації процесу; [4] – розробка структурної схеми аеробного очищення та проведення числових розрахунків; [20] – розрахунок зміни концентрації кисню та активного мулу в різних точках фільтра з часом; [1, 22] – знаходження розв'язку модельної задачі, розробка алгоритму оптимального керування та розробка системи автоматизації відповідних процесів.

Апробація результатів дослідження. Основні наукові результати роботи доповідалися і обговорювалися на наукових конференціях і семінарах різного рівня, зокрема: XII та XIII International scientific and technical conference “Computer Science and Information Technologies” (Львів, вересень 2017, 2018), Міжнародній науковій конференції присвяченій 80-річчю з дня народження Михайла Павловича Ленюка (Чернівці, жовтень 2016 р.), XII міжнародній конференції “Контроль і управління в складних системах” (КУСС-2014) (Вінниця, жовтень 2014 р.), III та VI міжнародній науково-практичних конференціях “Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки” (Чернівці, травень 2014 р., жовтень 2017 р.), Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами” (Київ, листопад 2014 р.), I Всеукраїнській науково-технічній конференції “Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015” (Житомир, квітень 2015 р.), Всеукраїнській науковій конференції “Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів” (Рівне, лютий 2015 р.),

Міжнародній науково-практичній конференції молодих науковців, аспірантів та студентів “Інформаційно-обчислювані технології, автоматика та електротехніка” (Рівне, жовтень 2016 р.), 8th International Academic Conference of Young Scientists “Computer Science and Engineering 2016” (Львів, вересень 2016), III Міжнародній науково-технічній internet-конференції “Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами” (Київ, листопад 2016 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції молодих вчених “Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології” (Покровськ, листопад 2016 р.), III Всеукраїнській науково-практичній конференції “Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій”, (Рівне, вересень 2017 р.), Міжнародній науковій конференції “Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій” (Рівне, березень 2018 р.).

У повному обсязі робота доповідалася на розширеному засіданні кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій і прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування (керівник – д.т.н., проф. Древецький В.В.), науковому семінарі кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України “Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського” (керівник – д.т.н., доц. Волощук В.А.).

Публікації. За основними матеріалами роботи опубліковано 22 наукові праці, у тому числі: 6 статей у фахових наукових виданнях з технічних наук, 3 публікації у наукових виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази Scopus, 1 до Web of Science, 16 публікацій в матеріалах міжнародних та національних конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, списку літератури та додатків і вміщує 122 сторінки основного тексту. Загальний обсяг роботи 172 сторінки, список літератури налічує 181 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дано загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність теми та необхідність проведення дослідження, сформульовано мету роботи та задачі дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі викладено огляд та проведено аналіз літератури за темою дисертації, визначено місце досліджень, наведених у роботі, у розв'язанні науково-технічного завдання вдосконалення режимів роботи очисних споруд шляхом їх автоматизації на основі розроблених нових математичних моделей процесів очищення технологічних вод. Здійснено огляд найбільш поширених методів очищення технологічних вод від забруднень різного роду. Наведено переваги і недоліки цих методів.

Для очищення технологічних вод промисловості використовують механічні, хімічні, фізико-хімічні та біологічні методи. Оскільки стоки являють собою комплекс забруднень різного роду, на практиці використовують комбінацію різних методів для ефективного очищення. Головною ж метою автоматизації таких

процесів є покращення якості очищеної води, зменшення експлуатаційних витрат та покращення умов праці.

Автоматизацією процесу біологічного очищення на основі математичного моделювання займаються В.Г. Плехов, В.В. Дяченко, І.Л. Дяченко. Ними було розроблено нейронну мережу для покращеного керування комплексом очисних споруд, де в якості вхідних даних використовують рН, концентрацію нафтопродуктів, концентрацію завислих речовин, концентрацію фенола, концентрацію іонів амонію, хлоридів, сульфатів в очищуваній воді, а як вихідну змінну використовують концентрацію завислих речовин. І, згідно результатів розрахунку, використання нейронної мережі дозволяє зменшити концентрацію завислих речовин порівняно з роботою реальної системи. Але, оскільки керуючим параметром вони використовують швидкість обертання компресора, доцільно було б враховувати також концентрацію розчиненого кисню у воді, що дало б змогу розробити не просто «систему з випередженням», а «систему з випередженням та зворотнім зв'язком із проміжною точкою».

Побудовою системи біологічного очищення стічної води на основі гібридної нейронної мережі займаються Е.Г. Мурачев, Г.М. Холодов, О.І. Солопова. Ними розглядалися змінне навантаження на аеротенк, на основі якого розраховувалась необхідна концентрація кисню, який потрібно подати на вхід системи при заданій витраті.

Р.В. Федюн опублікував ряд робіт, присвячених математичному моделюванню, розробці комп'ютерних моделей та автоматизації процесу біологічного очищення стічних вод. До недоліків запропонованої моделі можна віднести те, що вона не враховує нерівномірність розподілу концентрації активного мулу, забруднення і кисню по довжині аеротенка, тобто не враховує дифузійний масоперенос. При моделюванні також автори не вказують в якій точці (на вході, виході) фільтра показано перехідні процеси біохімічного очищення.

Складову частину побудованих математичних моделей процесів очищення становлять результати досліджень суміжних задач масопереносу, висвітлені у працях І.В. Сергієнка, В.С. Дейнеки, В.В. Скопечького, С.І. Ляшка, В.М. Булавацького, Я.Й. Бурака, Я.Г. Савули, Б.В. Гери, Л.М. Журавчак, Я.Д. П'янила, Є.Я. Чаплі, О.Ю. Чернухи, В.І. Лаврика, А.П. Власюка, П.М. Мартинюка. У роботах А.Я. Бомби та А.П. Сафоника розв'язано наукові задачі розвинення теорії математичного моделювання нелінійних технологічних процесів очищення рідин від багатоконпонентних забруднень з урахуванням автоматизованого керування та ідентифікації параметрів при домінуванні одних компонент процесу над іншими, а також розвинення методів розв'язання відповідних нелінійно-збурених задач, що націлено на покращення якості та підвищення інтенсивності механізмів очистки води.

Як свідчить аналіз публікацій з визначеної проблематики є ряд невирішених задач. Одна з них – це розробка системного підходу до вдосконалення режимів роботи очисних споруд шляхом їх автоматизації на основі розроблених нових математичних моделей процесів очищення технологічних вод.

У другому розділі вдосконалено математичну модель магнітного фільтра (1), яка дозволяє дослідити критичний час роботи фільтра при змінній концентрації феромагнітних домішок, що надходять у фільтр:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sigma(\rho)C(x,t))}{\partial t} + \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial vC(x,t)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial\rho(x,t)}{\partial t} = \beta(H, v, d)C(x,t) - \varepsilon\alpha(\rho)\rho(x,t), \end{cases} \quad (1)$$

$$C|_{x=0} = C_*(t), C|_{t=0} = 0, \rho|_{x=0} = 0, \rho|_{t=0} = 0, \quad (2)$$

$$v = k(\rho) \cdot \text{grad } P, \quad (3)$$

де $C(x,t)$ – концентрація цільового компонента в рідкому середовищі, що фільтрується; $\rho(x,t)$ – концентрація домішок, осаджених у зернистому фільтруючому матеріалі; ε – малий параметр; $C_*(t)$ – концентрація домішкових частинок на вході фільтра, P – тиск; l – довжина фільтра; β – коефіцієнт, що характеризує масові обсяги осадження домішкових частинок за одиницю часу ($\beta(H, v, d) = \beta_0 H^{0.75} / v d^2$, де β_0 – вільний параметр; H – напруженість магнітного поля; v – швидкість фільтрування; d – діаметр гранул фільтруючого матеріалу; $\alpha(\rho, H)$ – коефіцієнт, що характеризує масові обсяги відірваних за той же час від гранул фільтруючого матеріалу домішкових частинок; $\alpha(\rho) = \alpha_0 + \varepsilon\alpha_*\rho(x,t)$, $\sigma(\rho)$ – пористість фільтруючого матеріалу (σ_0 – вихідна пористість фільтруючого матеріалу), $\sigma(\rho) = \sigma_0 - \varepsilon\sigma_*\rho(x,t)$, $k(\rho)$ – коефіцієнт фільтрування, $k(\rho) = \begin{cases} k_0 - \varepsilon\gamma\rho(x,t), & \rho < \rho_0, \\ k_0 - \varepsilon\gamma\rho(x, \tau_s), & \rho \geq \rho_0, \end{cases}$ $\alpha_0, \alpha_*, \sigma_*, k_0, \gamma$ – жорсткі

параметри (вони характеризують відповідні коефіцієнти); $\alpha(\rho), \sigma(\rho), k(\rho)$ – змінні параметри (знаходяться дослідним способом). При цьому зазначимо, що в більш загальному випадку тиск $P = P(x,t)$ раціонально було б визначати в результаті

розв'язання рівняння $\frac{\partial}{\partial x} \left(k(\rho) \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\partial \sigma(\rho) P}{\partial t}$, отриманого на підставі

записаного вище рівняння руху і рівняння стану: $\text{div } v = \frac{\partial \sigma(\rho) P}{\partial t}$ при крайових

$P(0,t) = P_*(t), P(L,t) = P^*(t), (0 < t < \infty)$ і початкових $P(x,0) = P_*(x)$

$(0 < x < L)$ умовах ($P_*(t), P^*(t), P_*(x)$ – задані досить гладкі й погоджені в кутових точках області $G = \{(x,t) : 0 < x < L, 0 < t < \infty\}$ функції. При цьому, у процесі розв'язання задачі, можемо визначати відповідне значення $\text{grad } P$, зокрема – різницю тисків $\Delta P = P^*(t) - P_*(t)$ на вході й виході з фільтра.

Розв'язки модельної задачі (1) за умов (2) знайдено у вигляді асимптотичних рядів [6] з використанням додатку Simulink та М-функції *pdepe* (при наступних вхідних даних) $C_*(t) = 2 \text{ мг} / \text{дм}^3, l = 1 \text{ м}, v = 200 \text{ м} / \text{год}, \beta_0 = 0.7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 / \text{с},$

$H = 6 \text{ МА/м}$, $d = 24 \text{ мм}$, коефіцієнти $\alpha_0 = 0.28 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}$, $\alpha_* = 0.65$, $\varepsilon = 0.01$, $\sigma_0 = 0.5$, $k_0 = 1$).

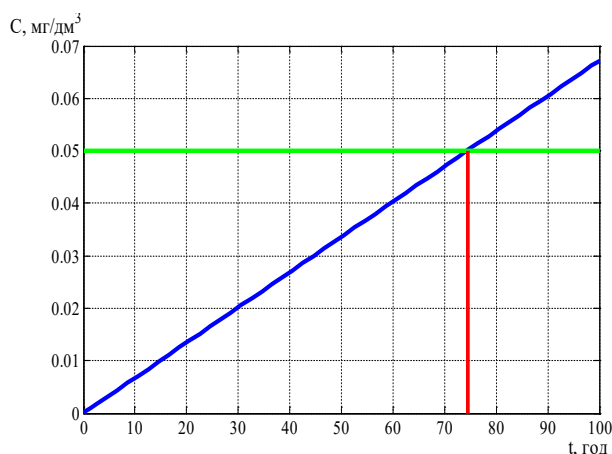


Рис. 1. Динаміка зміни концентрації домішок у рідині на виході з фільтра

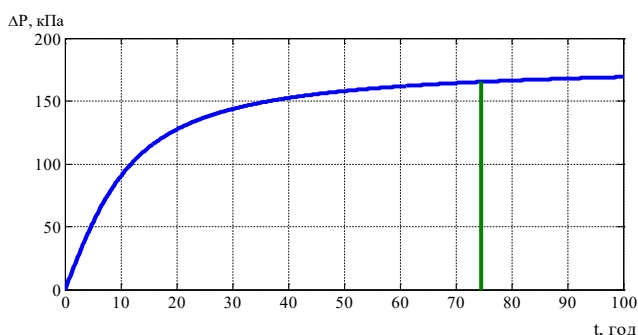


Рис. 2. Динаміка зміни втрати напору в магнітному фільтрі

Також проведено оцінку точності розробленої математичної моделі на основі експериментальних даних та розрахунків системи магнітного очищення технологічних вод за тих самих умов. Основою для розрахунку були швидкість фільтрування $v=50 \text{ м/год}$ та напруженість магнітного поля $H=40 \text{ кА/м}$, при цьому вхідна концентрація заліза у технологічній воді $C=250 \text{ мкг/дм}^3$. В ході експерименту змінювали довжину фільтра від 0.78 м до 3.12 м , при цьому проводили 5 замірів концентрації заліза на виході з фільтра та записували усереднене значення для відповідної довжини фільтруючої загрузки в табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика натурального та комп'ютерного експерименту

Показник	№ досліду				
	0	1	2	3	4
	0 м	0.78 м	1.56 м	2.34 м	3.12 м
Концентрація заліза на виході (експеримент) c , мкг/дм^3	250	55	48	45	42
Концентрація заліза на виході (розрахунок) c , мкг/дм^3	250	57.632	47.0531	42.855	39.737
Відносна похибка, %	0	4.78	1.97	4.77	5.39

Результати проведення комп'ютерного та натурального експериментів наведені на рис. 3.

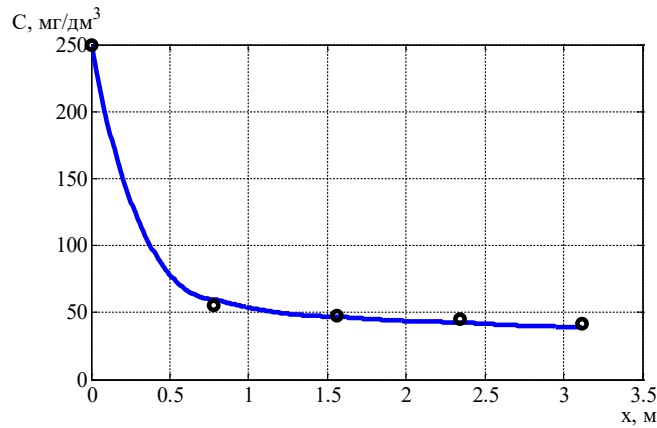


Рис.3. Залежність концентрації заліза від довжини фільтруючої загрузки

Показано, що похибка отриманих результатів не перевищує 6 %. Також було розроблено програмний комплекс для автоматизації процесу очищення технологічної води від феромагнітних домішок, яка забезпечує задану концентрацію залізовмісних домішок на виході з системи, здійснюючи керування системою за визначеним при моделюванні перепаді тиску.

Третій розділ присвячено моделюванню процесу біологічного очищення, що дозволило дослідити вплив концентрації кисню у воді при змінній вхідній концентрації домішок, які надходять до очисної системи, на активність бактерії з урахуванням температурного режиму.

Розроблена модельна задача (4)-(5) описує роботу біологічного реактора з врахуванням температурного режиму. Особливістю моделі є те, що кисень подається не тільки з забрудненням на початку очисної системи, а й додатково підводиться вздовж біореактора. Також враховується вплив температури навколишнього середовища, швидкості перенесення тепла на якість очищення технологічних вод.

$$\begin{cases} \frac{\partial C_i}{\partial t} = v_c \frac{\partial C_i}{\partial x} - \theta_i C_i B T + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_C \frac{\partial C_i}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial B}{\partial t} = v_B \frac{\partial B}{\partial x} + \theta B K T K_B + w_B + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_B \frac{\partial B}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial K}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_K \frac{\partial K}{\partial x} \right) - v_K \frac{\partial K}{\partial x} + K_K (B) \cdot (K_0 - K) - \gamma(T), \\ \frac{\partial T}{\partial t} + v_T \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + F_T + \frac{1}{\zeta \cdot c_w} \frac{\partial J}{\partial x}, \end{cases} \quad (4)$$

$$C_i|_{x=0} = C_i^*(t), \quad B|_{x=0} = B^*(t), \quad K|_{x=0} = K^*(t), \quad T|_{x=0} = T^*(t),$$

$$\left. \frac{\partial C_i}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{\partial B}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{\partial K}{\partial x} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l} = 0; \quad (5)$$

$$C_i|_{t=0} = C_i^*(x), \quad B|_{t=0} = B^*(x), \quad K|_{t=0} = K^*(x), \quad T|_{t=0} = T^*(x),$$

де C_i – концентрація цільового компоненту в рідкому середовищі, що фільтрується, B – концентрація активного мулу, K – концентрація кисню, необхідна для підтримання найкращого поглинання бактеріями забруднення, T – температура води в аеротенці, $v_C=k_Cv$, $v_B=k_Bv$, $v_K=k_Kv$, $v_T=k_Tv$ – швидкість руху субстрату, активного мулу, кисню та тепла, v – швидкість руху рідини, θ – коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості фільтра та швидкість потоку рідини, K_B – коефіцієнт поглинання кисню та бактерій, $K_K(B)=K_0-k_BB$ – функція, яка характеризує поглинання кисню, F_T – коефіцієнт теплообміну, J – потік сонячної енергії, K_0 – концентрація насичення води киснем при заданих температурі та тиску, ζ – густина води, c_w – питома теплоємність рідини, $C_i^*(t)$, $B^*(t)$, $K^*(t)$, $T^*(t)$, $C_i^*(x)$, $B^*(x)$, $K^*(x)$, $T^*(x)$ – задані функції в області $G=\{(x,t):0 < x < l, 0 < t < t_* < \infty\}$, $D_C=\varepsilon b_C(C_i(x,t-\tau))$, $D_B=\varepsilon b_B(B_i(x,t-\tau))$, $D_K=\varepsilon b_K(K_i(x,t-\tau))$, $D_T=\varepsilon b_T(T_i(x,t-\tau))$ – коефіцієнти дифузії субстрату, активного мулу, кисню, температури, ε – малий параметр, τ – час запізнення ($\tau > 0$), l – довжина біофільтра.

На основі розробленої моделі був проведений комп'ютерний експерименту при: $w_B = 0,0736$, $v_C = 0.26 \text{ м / год}$, $v_B = 0.092 \text{ м / год}$, $v_K = 0.053 \text{ м / год}$, $v_T = 0.53 \text{ м / год}$, $D_T = D_C = 1$, $D_B = D_K = 0.8$, $\theta_1 = 10^{-4}$, $\theta_2 = 10^{-3}$, $\theta_3 = 1.2 \cdot 10^{-3}$, $\theta_4 = 0.8 \cdot 10^{-3}$, $\theta_5 = 1.1 \cdot 10^{-4}$, $\theta_6 = 1.6 \cdot 10^{-4}$, $\theta_7 = 1.4 \cdot 10^{-5}$, $\theta_8 = 1.3 \cdot 10^{-5}$, $\theta_9 = 1.5 \cdot 10^{-4}$, $c_w = 4.2 \text{ Дж / кг} \cdot \text{К}$, $\zeta = 1000 \text{ кг / м}^3$, $\gamma(T) = -0,0003 \cdot T^2 + 0.2171 \cdot T + 6.8993$, $l = 100 \text{ м}$, $h = 2 \text{ м}$, $b = 5 \text{ м}$, $\varepsilon = 0.01$ (рис. 4-7).

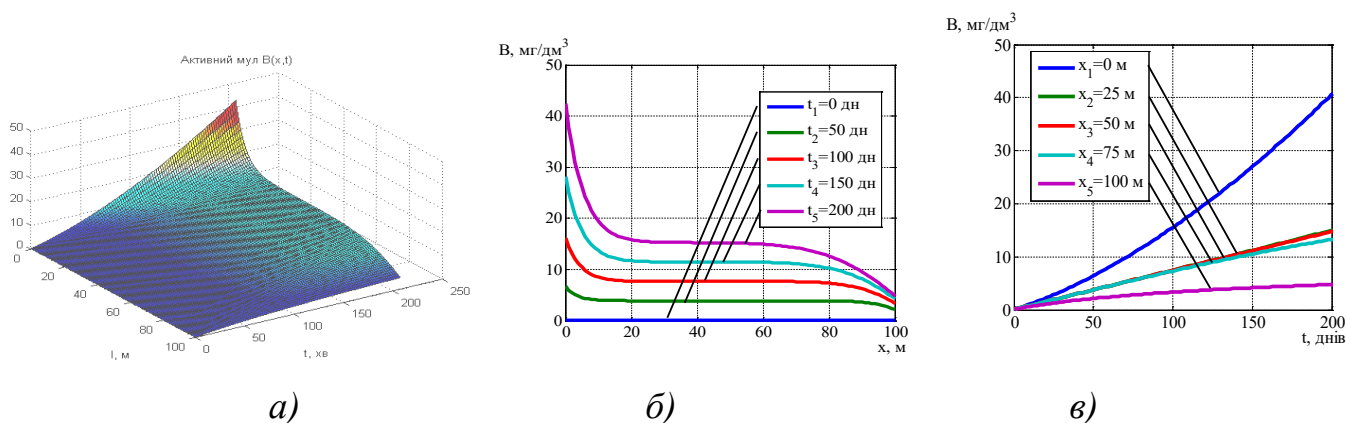


Рис.4. Розподіл зміни концентрації активного мулу: а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу; в) з часом в різних точках фільтра

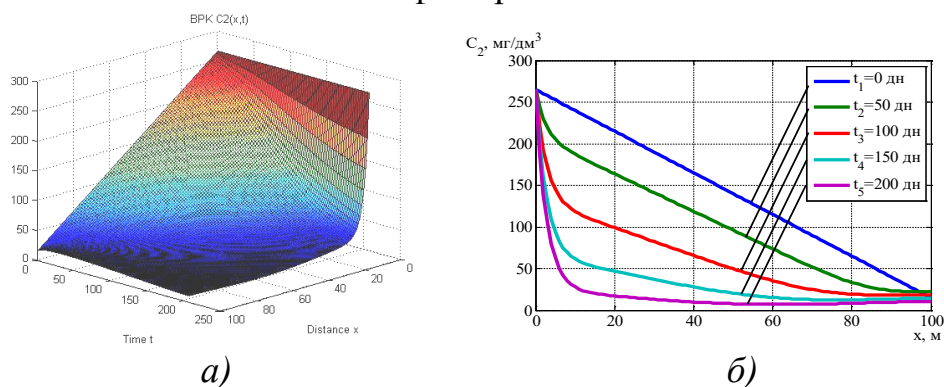


Рис. 5. Розподіл зміни концентрації БПК: а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

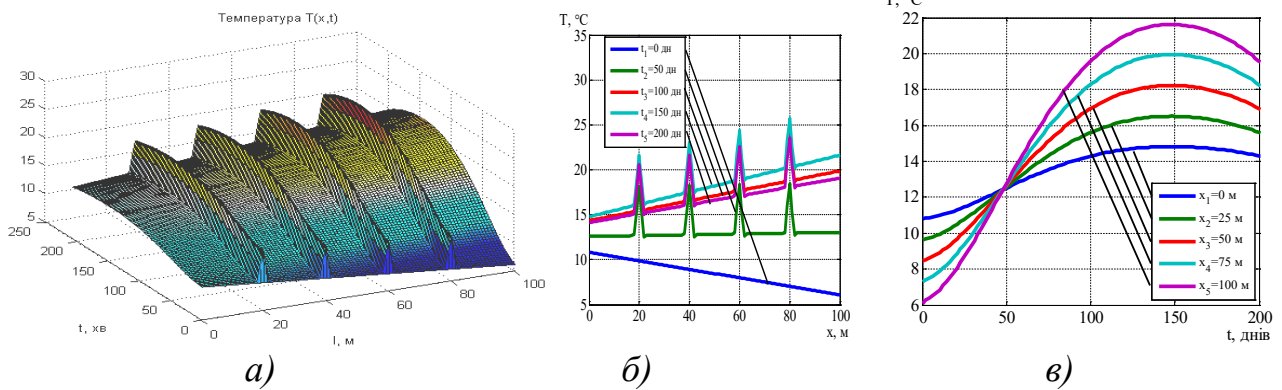


Рис. 6. Розподіл зміни температури: а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу; в) з часом в різних точках фільтра

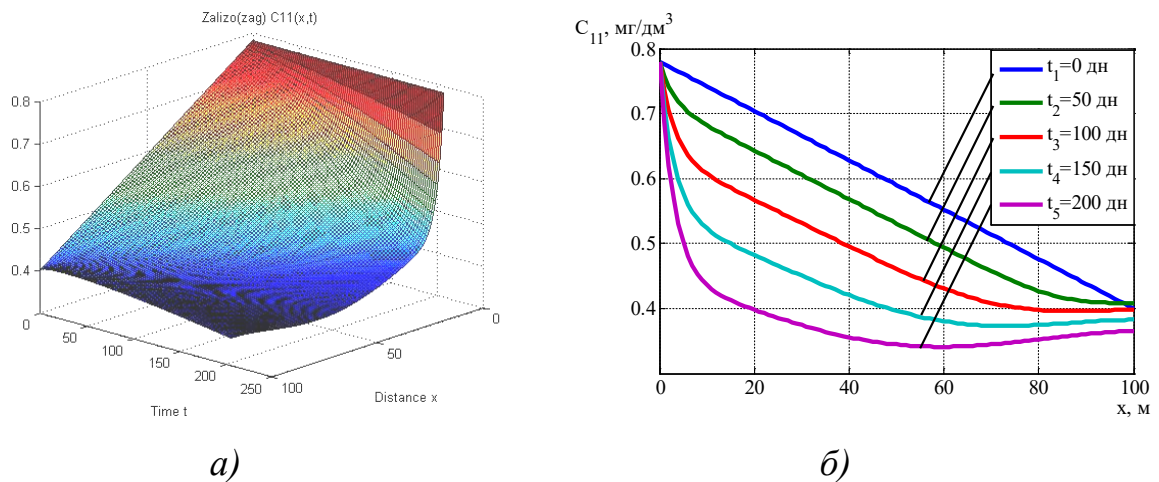


Рис. 7. Розподіл зміни концентрації заліза(загального): а) по всій довжині фільтра з часом; б) по довжині фільтра в різні моменти часу

З рис. 4 – рис. 5 видно, що найактивніше бактерії розмножуються на початку фільтра. Наявність постійної високої концентрації забруднення, кисню та постійної температури вхідної води сприяють розвитку активного мулу. Проте на виході з фільтра помітно тенденцію до повільнішого розмноження.

На зміну температури води впливає багато факторів, проте підведення тепла за рахунок теплоносія збільшує температуру води лише на 6 °С, як видно на рис. 6 (б). Це обумовлено тим, що передача тепла від нагрітого повітря до води відбувається повільно і час, за який нагріте повітря проходить від точки підведення до поверхні, реактора є малий. Значно більший вплив на нагрів чи охолодження води вносить температура навколишнього середовища, оскільки площі взаємодії на поверхні і через бічні стіни біореактора значно більші за площу взаємодії з теплоносієм. Також фактором впливу є швидкість руху води, бо при взаємодії з навколишнім середовищем спостерігається ламінарний режим руху води, а при взаємодії з теплоносієм виникають турбулентності, що також впливає на ефективність теплопереносу.

Отримані результати комп'ютерного експерименту відображають характер динаміки: а) в просторі з часом по кожній точці довжини фільтра; б) по довжині фільтра в моменти часу $t=0$, $t=50$, $t=100$, $t=150$, $t=200$ днів; в) з часом в точках

фільтра $x=0, x=25, x=50, x=75, x=100$ м. Як видно з рис. 7 бактерії поглинають забруднення найактивніше на початку фільтра.

Для підтвердження адекватності розробленої математичної моделі використано експериментальні дані з [6]. Було проведено 5 експериментів в ході яких проводилися вимірювання концентрації азоту загального, органічного та амонійного на вході в очисну споруду та на виході через певний час. Використавши дані про установку та концентрації вхідного забруднення було проведено розрахунок концентрації відповідного азоту на виході зі споруди (див. табл. 2). Результати перевірки адекватності розробленої математичної моделі на основі експериментальних даних наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Порівняльна характеристика натурального та комп'ютерного експерименту

Показник		№ досліду				
		1	2	3	4	5
Концентрація на вході в споруду	$N_{\text{заг}}^{\text{поч}}$	5.76	11.66	15.89	30.73	41.23
	$N_{\text{орг}}^{\text{поч}}$	0.4	0.69	1.04	2.38	3.58
	$N_{\text{NH}_3}^{\text{поч}}$	1.86	3.85	4.98	10	12.67
Концентрація на виході зі споруди(експеримент)	$N_{\text{заг}}^{\text{кін}}$	4.66	9.46	13.09	25.53	34.63
	$N_{\text{орг}}^{\text{кін}}$	0.17	0.3	0.52	1.31	2.08
	$N_{\text{NH}_3}^{\text{кін}}$	0.1	0.4	0.62	1.4	1.8
Концентрація на виході зі споруди(розрахунок)	$N_{\text{заг}}$	4.6635	9.4633	13.094	25.5276	34.6368
	Час, год	13.66337	13.36634	11.58416	10.69307	9.50495
	$N_{\text{орг}}$	0.1743	0.3013	0.5262	1.3060	2.0753
	Час, год	24.35644	25.24752	22.27723	20.19802	18.71287
	N_{NH_3}	0.0986	0.3889	0.6184	1.4099	1.8311
	Час, год	24.05941	20.79208	20.49505	24.35644	20.49505
Відносна похибка, %	$N_{\text{заг}}$	0.075107	0.034884	0.030558	0.009401	0.019636
	$N_{\text{орг}}$	2.529412	0.433333	1.192308	0.305344	0.225962
	N_{NH_3}	1.4	2.775	0.258065	0.707143	1.727778

Показано, що для всіх експериментів відносна похибка отриманих результатів не перевищує 3%.

На основі розробленої математичної моделі та проведеного комп'ютерного експерименту було розроблено програмний комплекс для автоматизації процесу біологічного очищення технологічних вод, впровадження якого дозволить забезпечити допустимі концентрації забруднення в очищеній воді при контролі концентрації кисню, що дозволить зменшити витрати на електроенергію без впливу на якість очистки.

В четвертому розділі розглянуто питання розробки математичної моделі очистки технологічних вод в електрокоагуляторі, а також вироблення коагулянту. Також проведено дослідження моделей шляхом зміни вхідних параметрів.

Так, у розділі було розроблено математичну модель, яка враховує сукупність взаємодії різних факторів залежно від: концентрації завислих речовин у воді, прикладеної величини струму, швидкості потоку та температур рідини, зовнішнього середовища, води в реакторі, конструктивних параметрів коагулятора:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = -v_c \nabla C + \nabla(D_c(T) \nabla C) + f_c(T)C + \Phi, \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -v_T \nabla T + D_T \Delta T + \Psi, \end{cases} \quad (6)$$

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

$$C(0,t) = C^0(t), T(0,t) = T^0(t), \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L} = 0, \quad (7)$$

де C – концентрація цільового компонента у воді; T – температура води в реакторі; $C_0(x), T_0(x)$ – концентрація цільового компонента та температури в початковий момент часу, $C^0(t), T^0(t)$ – концентрація цільового компонента та температури на вході в електрокоагулятор, D_T – коефіцієнти дифузії (m^2/c), q_T – інтенсивність внутрішніх джерел теплоти, v_c – швидкість поширення коагулянту (m/c), v_T – швидкість поширення температури (m/c), c_T – теплоємність ($Дж/кг$), ρ – густина ($кг/м^3$) L – довжина коагулятора (m), H – висота коагулятора (m), B – ширина коагулятора (m). Під час електрокоагуляції відбувається нагрівання розчину електроліту. Кількість теплоти $\Psi = q_T/c_T\rho$, яка при цьому виділяється, пропорційна величині струму, часу його проходження і падінню напруги $q_T = I \cdot U \cdot t$, U – прикладена напруга (B), I – величина струму (A), $f_c(T) = 3\eta R_g T I / 8 F d_b A_s P$ – функція, яка враховує флотаційну складову процесу [9], R_g – газова константа ($Дж/(моль \cdot K)$), d_b – діаметр бульбашок (m), P – атмосферний тиск ($Па$), A_s – площа поперечного перерізу камери (m^2) та η – ефективність накопичення однією бульбашкою – визначається як частка забруднюючої речовини на шляху бульбашки, які фактично налипають на бульбашку. Дифузійний рух частинок в рідині можна розглядати як рух з тертям, до нього може бути застосовано друге співвідношення Ейнштейна: $D_c(T) = U_c k T$. Тут k – стала Больцмана ($Дж/К$), U_c – рухливість дифундуючих частинок, тобто коефіцієнт пропорційності між швидкістю частинки і рушійною силою ($Па \cdot c \cdot m$). Якщо частки сферично симетричні, то $U_c = 1/(6\pi hr)$, де h – коефіцієнт в'язкості рідини, r – радіус частинки [9]. В [9] також запропоновано числові вирази для розрахунку η . $\Phi = It/V_A n F + k_h S_k t$ – функція що відповідає за електрохімічну реакцію, тут V_A – об'єм апарата (m^3), n – кількість електронів реакції, F – стала Фарадея ($Кл/моль$), k_h – константа швидкості гетерогенної реакції ($моль/м^5 \cdot c$), S_k – площа катода (m^2).

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

Шляхом комп'ютерного моделювання за наведеними вхідними даними: $C|_{t=0} = 8.87 \text{ мг} / \text{дм}^3$, $T|_{t=0} = 18^\circ C$, $v = 0.12 \text{ м} / \text{с}$; $\eta = 0.8$; $R_g = 8.31, \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot K)$;

$F = 9.65 \cdot 10^4, Кл / моль$; $I = 70, А$; $A_s = 15, м^2$; $d_b = 1.5 \cdot 10^{-6}, м$; $U = 24, В$;
 $a = 0.12 \cdot 10^{-3}, м^2 / с$; $\lambda_m = 0.39, Вт / м \cdot с$; $a_2 = 880$; $\lambda = 0.4, Вт / м \cdot с$;
 $c = 3.31 \cdot 10^3, Дж / кг$; $\zeta = 1060, кг / м^3$; $a_1 = 290$; $D = 10^{-9}, м^2 / с$ – отримали такі результати (рис. 8):

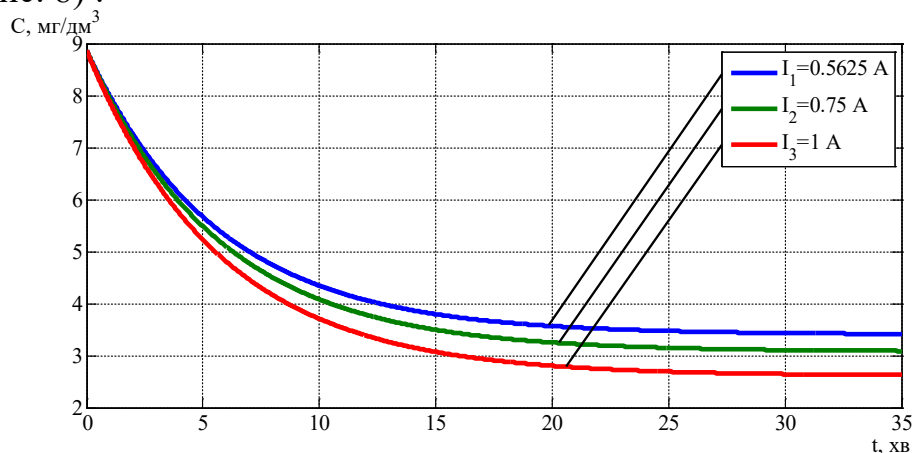


Рис. 8. Зміна концентрації іонів нікелю на виході з коагулятора з часом при величині струму $I_1 = 0.5625 А$ - крива 3, $I_2 = 0.75 А$ - крива 2, $I_3 = 1 А$ - крива 1

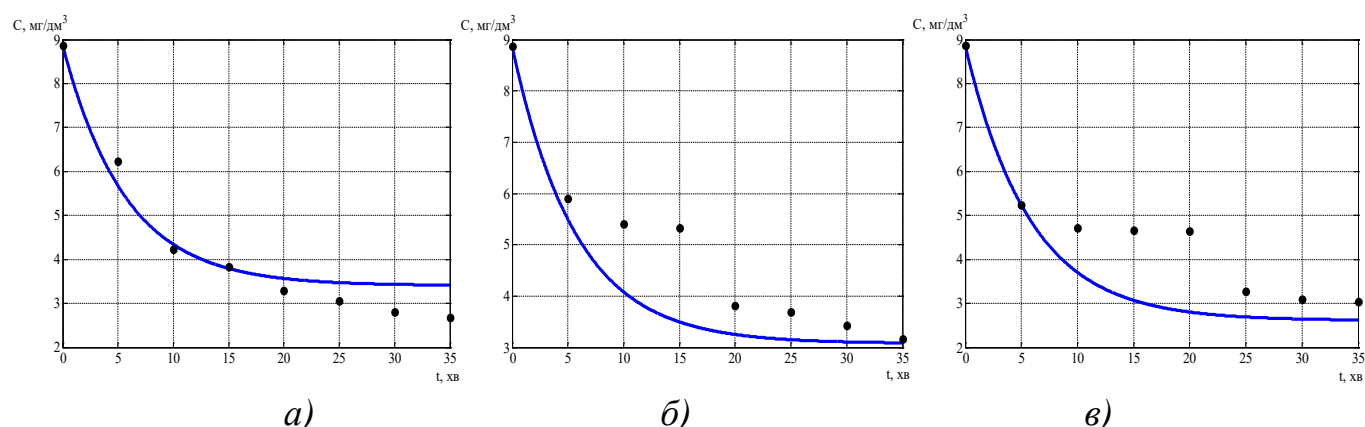


Рис.9. Зміна концентрації забруднення від часу при густині струму $i = 9 А / м^2$ – а), $i = 12 А / м^2$ – б) та $i = 16 А / м^2$ – в)

Представлені на рис. 9 результати експериментів і моделювання свідчать про те, що отримана модель адекватно описує зміни, що проходять в реакторі. Відхилення, які найбільш видно на рис. 9 в, зумовлені розбіжністю і неточністю проведення експерименту, проте відмінно вказують характер і порядок зміни вихідної величини.

На основі розробленої модельної задачі (6)-(7) проведено дослідження впливу величини струму на концентрацію іонів нікелю. В якості вихідних даних використовували ДСТУ, згідно з яким концентрація іонів нікелю у стічних водах не повинна перевищувати $3.2 мг/дм^3$, але, в зв'язку з інерційністю регулятора та системи, в якості допустимої концентрації домішок використаємо значення $3.0 мг/дм^3$. Також для моделювання використовували експериментальні дані, згідно з якими за 35 хв система повинна забезпечувати допустиму концентрацію домішок. Отже, при моделюванні керувалися наступним принципом: за 35 хв система має очистити концентрацію іонів нікелю до $3.0 мг/дм^3$. При зміні концентрації

забруднення на вході отримували значення величини струму, яку необхідно прикласти, результати наведено в таблиці 3.

Таблиця 3. Залежність величини струму від вхідної концентрації іонів нікелю

№	Концентрація іонів нікелю, мг/дм ³	Величина 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

З допомогою програми Matlab проведено апроксимацію отриманих даних для отримання коефіцієнтів поліноміального ряду. В результаті отримали залежність зміни величини струму від вхідної концентрації іонів нікелю, представлену формулою (8), яка виступає в системі як П-регулятор:

$$I = 0.1265 \cdot C_{in} - 0.3738. \quad (8)$$

Для перевірки роботи регулятора розроблено комп'ютерну модель, яка складається з двох субсистем "Regulator", "Coagulator". В підсистемі "Regulator" реалізовано залежність (8), яка оптимізує величину струму, що протікає між катодом і анодом, та дозволяє економити витрати електроенергії. Після проведення моделювання отримано результати, представлені на рис. 9, де в якості вхідної концентрації забруднення використано випадковий сигнал, сформований блоком «Random number» (рис. 9), що відповідає значенню вхідної концентрації в заданому діапазоні.

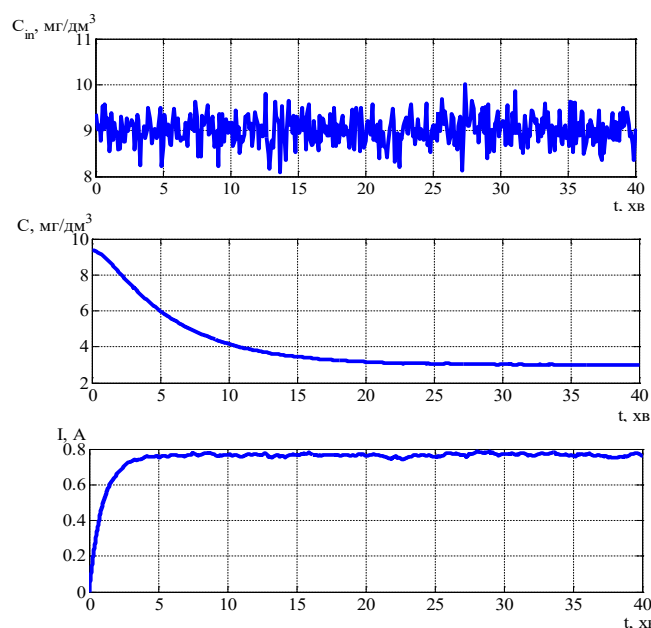


Рис. 9. Результати моделювання: C_{in} – зміна вхідної концентрації, C – розподіл вихідної концентрації, I – розподіл величини струму

Виходячи з результатів, наведених на рис. 9, розроблено алгоритм керування системою з врахуванням наступних чинників: електрокоагулятор повинен виробляти задану концентрацію двовалентного заліза при різних витратах технологічних вод; величина струму має бути на заданому рівні, що постійно змінюється; зміна концентрації забруднення у стічних водах не має впливати на якість очищення.

На основі розробленої автоматизованої системи, було проведено дослідження процесу очищення технологічних вод у текстильному виробництві з використанням в якості коагулянту іонів заліза. Проектована система відзначається високим рівнем керованості та гнучкості при зміні об'ємів очищуваних стоків.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, у якому розв'язано важливу науково-прикладну задачу вдосконалення режимів роботи очисних споруд шляхом їх автоматизації на основі розроблення нових та удосконалення існуючих математичних моделей процесів очищення технологічних вод. При цьому отримано такі основні результати та висновки:

1. Узагальнено математичну модель процесу магнітного очищення технологічних вод від феромагнітних домішок, що враховує зворотній вплив характеристик процесу на параметри середовища. Проведено оцінку точності розрахунку запропонованої моделі і показано, що максимальне відхилення від експериментальних даних становить 5%. Це дало змогу шляхом комп'ютерного моделювання визначити час захисної дії фільтра, граничне завантаження осаду та розробити програмний комплекс для автоматизації процесу магнітного очищення технологічних вод при використанні отриманих результатів. Такий підхід при проектуванні систем забезпечує можливість значного зменшення витрати на дороговартісні експерименти при пуско-налагоджувальних роботах, а також значно полегшує обслуговування технологічного обладнання.

2. Удосконалено математичну модель біологічного очищення технологічних вод, яка дозволяє розрахувати концентрацію домішок на виході з очисних споруд при змінній концентрації вхідного забруднення, концентрації кисню, концентрації бактерій. Показано, що похибка отриманих результатів становить 3%. Проведено дослідження впливу концентрації кисню на активність бактерій і відповідно якість очищення технологічних вод. Згідно з розрахунками розроблено автоматизовану систему керування процесом біологічного очищення технологічних вод, впровадження якої забезпечить допустиму якість очищеної води при зменшенні витрат на електроенергію.

3. Вперше розроблено математичну модель очищення технологічних вод від іонів важких металів методом електрокоагуляції. Проведено дослідження впливу величини струму між пластинами коагулятора на концентрацію іонів нікелю в очищеній воді шляхом комп'ютерного моделювання і підтверджено адекватність отриманих результатів порівнянням з експериментальними даними. Розроблено програмний комплекс для автоматизації процесу очищення технологічних вод, де основним контуром є регулювання величини прикладеної напруги до пластин коагулятора. Впровадження автоматизації дозволить збільшити ресурс роботи обладнання при контролі якості очищеної води.

4. Вперше розроблено математичну модель отримання заданої концентрації двовалентного заліза при встановлених параметрах коагулятора. Проведено дослідження впливу величини струму між катодом і анодом, температури водного середовища на концентрацію отриманого коагулянту шляхом комп'ютерного моделювання. Розроблено автоматизовану систему очищення технологічних вод текстильного виробництва з використанням в якості коагулянту іонів заліза. Це дало змогу забезпечувати якість очищеної води при змінній витраті технологічних вод, концентрації вхідного забруднення.

5. Практичне значення дисертаційної роботи полягає в наступному: розроблено програмний комплекс для автоматизації процесів очищення технологічних вод, який було використано під час модернізації роботи системи біологічного очищення технологічних вод ТОВ "Свиспан Лімітед", при проектуванні електрокоагуляційних установок ТОВ "Е.Т.Е", при налаштуванні режимів та автоматизації роботи водопідготовчих установок на РОВКП ВКГ "Рівнеоблводоканал".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Safonyk A., Bomba A., Tarhoni I. Modeling and automation of the electrocoagulation process in water treatment. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 871. P. 451-463. Scopus
2. Сафоник А.П., Клепач М.І., Таргоній І.М. Дослідження та автоматизація реакторів біологічного очищення стоків при контролі концентрації кисню. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. № 3(42). С.192-197. Web of science
3. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Комп'ютерне моделювання та автоматизація процесу магнітного очищення води. *Бионика интеллекта: научно-технический журнал*. 2014. №2(83). С. 117-122.
4. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Комп'ютерне моделювання процесу аеробного очищення технологічних вод. *Пробл. машиностроения*. 2016. Том 19, №2. С.31–36.
5. Сафоник А. П., Таргоній І. М., Пасічник В. А. Моделювання процесу електрокоагуляційного очищення рідин. *Вісник Інженерної академії України*. 2018. №1. С. 105–110.
6. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Моделювання та автоматизація процесу отримання електрокоагулянту для освітлення та знебарвлення промислових технологічних вод. *Електронне моделювання*. 2019. Т. 41. №5. С. 17-33.
7. Safonyk A., Targoni I., Bomba A. Development of an automated decision support system for the process of biological wastewater treatment. *Computer Science and Information Technologies: proceedings of the XII international scientific and technical conference*. 2017. Vol. 1. P. 71–75. Scopus
8. Safonyk A., Targoni I., Martyniuk Y., Bomba A. Research and automation of the process of wastewater treatment electrocoagulation. *Computer Science and Information Technologies: proceedings of the XIII international scientific and technical conference*. 2018. Vol. 1. P. 84-88. Scopus
9. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Моделювання та автоматизація процесу магнітного фільтрування води. *Контроль і управління в складних системах: матеріали XII Міжнародної конференції*. Україна. Вінниця. 2014. С. 167.

10. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Комп'ютерне моделювання процесу магнітного очищення рідин з ідентифікацією масообмінного коефіцієнта. *Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: праці III-ї Міжнародної науково-практичної конференції*. Україна. Чернівці. 2014. С. 70-72.
11. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Автоматизація процесу очищення технологічних вод від нафти з використанням магнітних фільтрів. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами: матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції*. Україна. Київ. 2014. С. 89-90.
12. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Автоматизація процесу знезалізнення технічної води. *Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015: тези I Всеукраїнської науково-технічної конференції*. Україна. Житомир. 2015. С. 85-86.
13. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Комп'ютерне моделювання і дослідження процесу магнітного осадження домішок. *Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислюваних методів: матеріали конференції*. Україна. Рівне. 2015. С. 146.
14. Safonyk A., Targoniy I. The automation of aerobic wastewater treatment. *Computer Science and Engineering : proceedings of the 8th International academic conference. Ukraine. Lviv. 2016. P. 33-34.*
15. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Про моделювання та автоматизацію процесу аеробного очищення технологічних вод. *Телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології: збірка доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених*. Україна. Покровськ. 2016. С. 194-197.
16. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Дослідження впливу БПК на якість аеробного очищення технологічних вод. *Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами: матеріали III Міжнародної науково-технічної internet-конференції*. Україна. Київ. 2016. С. 15-16.
17. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Автоматизація процесу аеробного очищення технологічних вод. *Інформаційно-обчислювальні технології, автоматика та електротехніка: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців, аспірантів та студентів*. Україна. Рівне. 2016. С. 243–244.
18. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Про моделювання процесу аеробного очищення технологічних вод з урахуванням зворотного впливу. *Міжнародна наукова конференція, присвячена 80-річчю від дня народження Михайла Павловича Ленюка: матеріали конференції*. Україна. Чернівці. 2016. С. 225-227.
19. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Розробка системи візуалізації для керування процесом очищення технологічних вод. *Комп'ютерне моделювання та програмне забезпечення інформаційних систем і технологій: збірник наукових праць III Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Україна. Рівне. 2017. С. 169-170.
20. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Комп'ютерне моделювання процесу очистки технологічних вод в реакторах біологічного очищення. *Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки: праці VI Міжнародної науково-практичної конференції*. Україна. Чернівці. 2017. С. 117-119.

21. Сафоник А. П., Таргоній І. М. Розроблення імітаційної моделі процесу електрокоагуляції. *Сучасні проблеми математичного моделювання, обчислювальних методів та інформаційних технологій: матеріали Міжнародної наукової конференції*. Україна. Рівне. 2018. С. 212-213.

22. Safonyk A., Burduk A., Targoniy I. Research of simulation model of electrocoagulation process. *Modeling, Control and Information Technologies: proceedings of International scientific and practical conference*. Ukraine. Rivne. 2019. P. 117–118.

АНОТАЦІЯ

Таргоній І.М. Математичне та комп'ютерне моделювання процесів очищення технологічної води для їх автоматизації. – *На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет водного господарства та природокористування МОН України, Рівне, 2020.

Дисертація присвячена вдосконаленню режимів роботи очисних споруд шляхом їх автоматизації на основі розроблених нових та удосконалення існуючих математичних моделей процесів очищення технологічних вод. Вдосконалено існуючі математичні моделі процесів очищення технологічних вод з використанням магнітного, біологічного та електрокоагуляційного очищення. Враховано взаємний вплив характеристик середовища на параметри процесу. Проведено розрахунок критичного часу роботи магнітного фільтра, а також перепад тиску, що утвориться при цьому з використанням комп'ютерного моделювання. Наведено результати розрахунків розподілу концентрації домішок та осаду по довжині магнітного фільтра. Досліджено вплив концентрації кисню та температури водного середовища на рівень активного мулу і відповідно на концентрацію забруднення на виході з біологічного фільтра. Наведено результати розрахунків розподілу концентрації домішок, активного мулу, кисню по довжині фільтра в різні моменти часу та в різних координатах з часом. Розроблено математичну модель очищення технологічних вод методом електрокоагуляції, яка дозволяє визначити вплив величини струму між пластинами коагулятора на якість очищення технологічної води від концентрацію іонів нікелю. Проведено комп'ютерне моделювання з використанням додатку Simulink програмного середовища Matlab. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації іонів заліза, температури водного середовища при різній величині струму між катодом і анодом. Розроблено систему автоматизації відповідних процесів з використанням результатів моделювання.

Ключові слова: математичне, комп'ютерне моделювання, очищення технологічних вод, автоматизація технологічних процесів, магнітне очищення, біологічний фільтр, електрокоагуляція, крайові задачі, диференціальні рівняння в частинних похідних, асимптотичний метод.

АННОТАЦИЯ

Таргоний И.Н. Математическое и компьютерное моделирование процессов очистки технологической воды для их автоматизации. – *На правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет водного хозяйства и природопользования МОН Украины, Ровно, 2020.

Диссертация посвящена усовершенствованию режимов работы очистных сооружений путем их автоматизации на основе разработанных новых и усовершенствованию существующих математических моделей процессов очистки технологических вод. Усовершенствовано существующие математические модели процессов очистки технологических вод с использованием магнитного, биологического и электрокоагуляционного способа очистки. Учтены взаимное влияние характеристик среды на параметры процесса. Проведен расчет критического времени работы магнитного фильтра, а также перепада давления, полученного при этом с использованием компьютерного моделирования. Приведены результаты расчетов распределения концентрации примесей и осадка по длине магнитного фильтра. Исследовано влияние концентрации кислорода и температуры водной среды на уровень активного ила и соответственно на концентрацию загрязнения на выходе из биологического фильтра. Приведены результаты расчетов распределения концентрации примесей, активного ила, кислорода по длине фильтра в разные моменты времени и в разных координатах со временем. Разработана математическая модель очистки технологических вод методом электрокоагуляции, которая позволяет определить влияние величины тока между пластинами коагулятора на качество очистки технологической воды от концентрации ионов никеля. Проведено компьютерное моделирование с использованием приложения Simulink программной среды Matlab. Приведенные результаты расчетов распределения концентрации ионов железа, температуры водной среды при различной величине тока между катодом и анодом. Разработана система автоматизации соответствующих процессов с использованием результатов моделирования.

Ключевые слова: математическое, компьютерное моделирование, очистка технологических вод, автоматизация технологических процессов, магнитная очистка, биологический фильтр, электрокоагуляция, краевые задачи, дифференциальные уравнения в частных производных, асимптотический метод.

ABSTRACT

Targonyi I.M. Mathematical and computer modeling of the process of water treatment processes for their automation. – On the right of manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering, specialty 01.05.02 - mathematical modeling and computational methods. - National University of Water and Environmental Engineering, Ministry of Education and Science of Ukraine, Rivne, 2020.

The thesis is a completed scientific research, which solves the important scientific and technical problem of improving the modes of operation of treatment facilities by automating them on the basis of new mathematical models of processes of purification of technological waters.

The first section provides an overview and analysis of the literature on the topic of the thesis, identifies the tasks of the research presented in the work in solving the scientific and technical task of developing new mathematical models for process of water treatment for their automated control. The second section describes the problem of the water treatment process with magnetic filters. In the developed mathematical model of magnetic purification, the reverse influence of process characteristics (concentration of contamination of liquid and trapped particles) on the characteristics of the media (coefficients of porosity, filtration, mass transfer, magnetic field intensity) was taken into account. To simulate the operation of the magnetic filter in the Simulink application of the MatLab software environment we found a solution to the problem. Based on the obtained results, the filter protective time and pressure drop were determined. The third section is devoted to the mathematical modeling of the process of biological water treatment. In this section, mathematical models of biological purification are developed that take into account a number of basic parameters, such as: variable input concentration of pollution, variable concentration of oxygen, temperature of the aquatic environment, etc. The fourth section is devoted to the mathematical modeling and automation of electrocoagulation processes. The description of the mathematical model takes into account the processes that take place in the electrocoagulation plant, as a set of interaction of various factors depending on: the concentration of suspended solids in water, the applied force of the current, the flow rate and temperature of the fluid, the external environment, water in the reactor, the design parameters of the electrocoagulation plant.

The results of the thesis were used in the design of the electrocoagulation plant for the treatment of process waters of the textile industry by the Limited Liability Company "E.T.E."; during the modernization of the existing water treatment system by the Rivne Regional Production and Utility Enterprise of the water supply and sewerage system "Rivneoblvodokanal"; in improving the operation of the biological wastewater treatment system by Limited Liability Company "Swisspan Limited". The results obtained are implemented in the educational process in the preparation of special courses "Numerical Methods", "Numerical Methods in Electric Power Engineering" (Department of Automation, Electrical and Computer-Integrated Technologies of the National University of Water and Environmental Engineering) for students of the National University of Water and Environmental Engineering of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Keywords: mathematical, simulation and computer modeling, water treatment process, automation process, magnetic purification, biological filter, electrocoagulation, boundary value problems, partial differential equations, asymptotic method.

Підписано до друку 25.08.2020 р. Формат 60×90 ¹/₁₆.
Папір друкарський № 1. Гарнітура Times.
Друк різнографічний. Ум.-друк. арк. 1,0.
Тираж 100 прим. Зам. № 5492.

Видавець і виготовлювач
Редакційно-видавничий відділ Національного університету
водного господарства та природокористування,
33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції РВ № 31 від 26.04.2005 р.