

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/30.12.2019.T.03.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

TOSHKENT KIMYO-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

ESHBOBAYEV JALOLIDDIN ABDURAZZAQOVICH

**OQOVA SUVLARNI TOZALASH JARAYONINI INTELLEKTUAL
BOSHQARISH USULLARI VA ALGORITMLARI**

05.01.08 - Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni avtomatlashtirish va boshqarish

**texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent–2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Content of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)

Eshbobayev Jaloliddin Abdurazzaqovich

Оқова сувларни тозалаш jarayonini intellektual boshqarish
usullari va algoritmlari.....3

Эшбобаев Жалолиддин Абдураззакович

Методы и алгоритмы интеллектуального управления очисткой
сточных вод.....21

Eshbobaev Jaloliddin Abdurazzakovich

Methods and algorithms of intelligent control of the wastewater
treatment process.....39

E’lon qilingan ishlar ro’yxati

Список опубликованных работ
List of published works.....42

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/30.12.2019.T.03.02 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

TOSHKENT KIMYO-TEXNOLOGIYA INSTITUTI

ESHBOBAYEV JALOLIDDIN ABDURAZZAQOVICH

**OQOVA SUVLARNI TOZALASH JARAYONINI INTELLEKTUAL
BOSHQARISH USULLARI VA ALGORITMLARI**

05.01.08 - Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni avtomatlashtirish va boshqarish

**texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi
AVTOREFERATI**

Toshkent–2025

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.3.PhD/T4873 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent kimyo-texnologiya institutida bajarilgan.
Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.tdtu.uz) hamda "ZiyoNet" Axborot ta'lim portalida (www.ziynet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	Xamidov Baxodir Tadjiddinovich texnika fanlari nomzodi, dotsent
Rasmiy oponentlar:	Muxitdinov Jaloliddin Paxritdinovich texnika fanlari doktori, professor Alimova Gulchexra Raximjonovna texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent
Yetakchi tashkilot:	Qarshi davlat texnika universiteti

Dissertatsiya himoyasi Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universitetidagi huzuridagi DSc.03/30.12.2019.T.03.02 raqamli Ilmiy kengashning 2025-yil "20" 12 soat 10:00 da majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100095, Toshkent shahar, Universitet ko'chasi, 2. Tel.: (+998) 71-246-46-00, faks (+998) 71-227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (60 raqami bilan ro'yxatga olingan). (Manzil: 100095, Toshkent shahar, Universitet ko'chasi, 2. Tel.: (+998) 71-207-14-70).

Dissertatsiya avtoreferati 2025-yil "6" 12 kuni tarqatildi.
(2025-yil "6" 09 da 13 raqamli reyestr bayonnomasi).



N.R. Yusupbekov
Ilmiy darajalar beruvchi
ilmiy kengash raisi,
t.f.d, professor, O'zR FA akademigi

U.F.Mamirov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy
kengash ilmiy kotibi,
t.f.d, professor

X.Z.Igamberdiyev
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi,
t.f.d, professor, O'zR FA akademigi

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. Jahonda suv resurslarining taqsimlanish jarayonini boshqarish va sanoat chiqindi suvlari ya'ni oqova suvlarni tozalash jarayonlari ekologik va iqtisodiy barqarorlikning eng muhim omillaridan biri sifatida qaralmoqda. Mavjud tozalash texnologiyalari yetarlicha rivojlangan bo'lishiga qaramay, ularning energiya samaradorligini oshirish, ekspluatatsiya xarajatlarini kamaytirish va yuqori sifat ko'rsatkichlarini ta'minlash bugungi kunda dolzarb muammo bo'lib qolmoqda. Oqova suvning tarkibi sanoat tarmoqlariga qarab keskin farqlanishi, undagi kimyoviy elementlarning o'zgaruvchanligi va jarayonning dinamik xususiyati tufayli energiya va resurs tejamkor, intellektual boshqarish tizimiga ega bo'lgan tozalash texnologiyalarini ishlab chiqish alohida ahamiyat kasb etmoqda. Shu bois, suv resurslaridan oqilona foydalanish va oqova suvlarni tozalash jarayonlarini intellektual texnologiyalarni qo'llash orqali boshqarish suv tanqisligi muammosini bartaraf etish yo'lidagi istiqbolli yondashuvlardan biri sifatida ko'rilmoqda.

Jahonda texnologik jarayonlarni avtomatlashtirish va raqamlashtirishning zamonaviy bosqichlaridan biri sifatida intellektual boshqarish tizimlarini joriy etish hisoblanmoqda. Xususan, oqova suvlarni tozalash jarayonida sun'iy intellektni qo'llagan holda adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish algoritmlarini ishlab chiqish orqali boshqarish tizimlari samaradorligini oshirishning eng istiqbolli yechimlaridan biri sifatida e'tirof etilmoqda. Ushbu tizimlar jarayon parametrlarini real vaqt rejimida kuzatish, noaniqliklarni kompensatsiyalash, energiya sarfini kamaytirish va tozalash sifatini oshirish imkonini berishi ilmiy tomondan isbotlanmoqda. Bu borada, oqova suvlarni ion-almashinish smolalari yordamida tozalash jarayonidagi texnologik parametrlarni noqat'iy mantiqiy va neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish tizimlarini ishlab chiqish muhim vazifalardan biri hisoblanmoqda.

Mamlakatimizda chuchuk suv tanqisligi ortib borayotgan sharoitda ushbu muammoni bartaraf etishning muhim yo'nalishlari sifatida mavjud suv resurslaridan oqilona foydalanish, suvni tejoychi texnologiyalarni keng tatbiq etish hamda oqova suvlarni qayta ishlash masalalari davlat siyosati darajasida ustuvor ahamiyat kasb etmoqda. Xususan, "O'zbekiston-2030" taraqqiyot strategiyasining¹ "Suv resurslarini tejash va atrof-muhitni muhofaza qilish" yo'nalishida suv resurslaridan samarali foydalanish, qishloq xo'jaligi va sanoat sohalarida suv tejoychi texnologiyalarni keng qo'llash, shuningdek, atrof-muhitga oqova suvlarni chiqarishni kamaytirish kabi vazifalar belgilab berilgan. Mazkur vazifalarni amalga oshirish, xususan, oqova suvlarni qayta ishlash texnologiyalarining energiya sarfini kamaytirish, boshqarish tizimlarini modellashtirish va intellektual yondashuv asosida optimallashtirish muhim vazifalardan biri hisoblanadi.

O'zbekiston Respublikasining 2022 yil 22 iyuldagi O'RQ-784-son «Ichimlik suvi ta'minoti va oqova suvlarni chiqarib yuborish to'g'risida» Qonuni, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023 yil 1 apreldagi PQ-107-son «Suv resurslaridan foydalanish samaradorligini oshirish bo'yicha kechiktirib bo'lmaydigan chora-tadbirlar

¹ O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2023-yil 11-sentabrdagi PF-158-son «"O'zbekiston-2030" strategiyasi to'g'risida» Farmoni.

to'g'risida» gi, 2022 yil 1 martdagi PQ-145-son «Quyida bo'g'inda suv resurslarini boshqarishni takomillashtirish hamda suv iste'molchilari orasidagi munosabatlarni tartibga solish chora-tadbirlari to'g'risida» qarorlari hamda boshqa me'yoriy-huquqiy hujjatlar sohada institutsional va huquqiy bazani mustahkamlashga qaratilgan bo'lib, mazkur dissertatsiya ishi ushbu vazifalarning amaliy bajarilishiga muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi. Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlanishining IV «Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish» ustuvor yo'nalishlariga muvofiq bajarilgan.

Muammoning o'rganilganlik darajasi. Ilmiy-texnik adabiyotlarda oqova suvlarni tozalash jarayoni intellektuallashtirish hamda ushbu jarayonning boshqarish tizimlari ishlab chiqish bo'yicha ko'plab ma'lumotlar yoritilgan. Adabiyotlar tahlili natijalari shuni ko'rsatadiki, texnologik jarayonlarni intellektual boshqarish sohasidagi tadqiqotlar ushbu muammoning o'rganilganlik darajasini namoyon etmoqda. Oqova suvlarni qayta ishlash jarayonini boshqarish bo'yicha xalqaro va mahalliy mutaxassislar tomonidan olib borilayotgan ilmiy-tadqiqotlar ham nazariy, ham amaliy jihatdan yuqori natijalarga erishilganligini ko'rsatadi. Bunda asosan klasik usullar keng qo'llanilmoqda. Jahonning yetakchi ilmiy markazlari va kompaniyalari, jumladan, Veolia Environnement (Fransiya), Xylem Inc. (AQSH), Siemens (Germaniya), Hitachi Aqua-Tech (Yaponiya), LIFE xalqaro laboratoriyasi, Global Water Intelligence, hamda oliy ta'lim muassasalari: Massachusetts texnologiya instituti (AQSH), Syurix ETH (Shveysariya), Tokio universiteti (Yaponiya) va Toshkent kimyo-texnologiya instituti kabi oliygohlar bu sohadagi ilmiy tadqiqotlar hamda innovatsion texnologiyalarni rivojlantirishga salmoqli hissa qo'shmoqda.

Oqova suvlarni qayta ishlash jarayonini boshqarishda intellektual texnologiyalardan foydalanish bo'yicha ilmiy muammolarni hal qilishda xorijiy olimlardan R.A.Aliev², T.Fukuda, va K.Lee, Domenico Curto³, Vincenzo Franzitta⁴, Edward Jones⁵, Manzoor Qadir, V.Tacana va boshqalar, hamda intellektual texnologiyalar asosida bu jarayonlarni boshqarish tizimlarini ishlab chiqish bo'yicha ilmiy muammolarni yechishga mamlakatimiz olimlaridan N.R.Yusupbekov⁶, X.Z.Igamberdiyev⁷, I.X.Siddiqov⁸, M.A.Ismoilov

² Zadeh, L.A.; Aliev, R.A. Fuzzy Logic Theory and Applications: Part I and Part II; World Scientific Publishing, 2018; USA, p.612

³ Judge, M.A.; Franzitta, V.; Curto, D.; Guercio, A.; Cirrincione, G.; Khattak, H.A. A Comprehensive Review of Artificial Intelligence Approaches for Smart Grid Integration and Optimization. *Energy Conversion and Management: X* 2024, Amsterdam, pp.2-27

⁴ D.Curto, V. Franzitta, A. Guercio: A review of the water desalination technologies. *Applied. Sciences* 2021. Basel. p.670

⁵ E. Jones, M. Qadir, M. T. H. Van Vliet, V. Smakhtin, and S. Kang, 'The state of desalination and brine production: A global outlook', *Sci. Total Environ.*, Mar. 2019, vol. 657, pp.1343–1356.

⁶ Yusupbekov N. R., Igamberdiyev H. Z., Mamirov U. F. Stable algorithms for adaptive control and adaptation of uncertain dynamic objects based on reference models //CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – T. 2965. – C. 296-302.

⁷ Igamberdiyev, H. Z., Yusupbekov, A. N., Zaripov, O. O., & Sevinov, J. U. (2017). Algorithms of adaptive identification of uncertain operated objects in dynamical models. *Procedia computer science*, 120, pp.854-861.

⁸ I.H. Sidikov, K.I. Usmanov, N.S. Yakubova. Synergetic control of nonlinear dynamic objects. «Chemical Technology. Control and Management». №2(92), 2020. T. pp.44-55

A.R.Marahimov⁹, Sh.M.Gulyamov, D.T.Muxamediyeva, A.A.Artikov, va boshqalar o‘zlarining katta hissalarini qo‘shishgan.

Ushbu tadqiqotlar orqali sezilarli ilmiy yutuqlarga erishilganligiga qaramay sanot oqova suvlarini qayta ishlash jarayonida samaradorlikni oshirish, resurs va energiya sarfini kamaytirish hamda atrof-muhitga zararni minimallashtirish kabi muammolar haligacha dolzarb sanaladi. Ushbu tadqiqot ishida, ion-almashinuvchi smolalar orqali oqova suvlarni tozalash jarayonini intellektuallashtirish, jumladan noqat’iy mantiqiy hamda adaptiv neyro-noqat’iy mantiqiy boshqarish tizimining modellari va sintezlash algoritmlarini ishlab chiqish, bu orqali jarayonning energiya sarfini kamaytirish, chiqindi suv sarfini minimallashtirish, atrof-muhitga salbiy ta’sirni kamaytirish kabi masalalar o‘z yechimini kutayotgan dolzarb muammolardan hisoblanib, ushbu yo‘nalishdagi izlanishlar ilmiy va amaliy ahamiyatga egadir.

Ilmiy tadqiqot ishini dissertatsiya ishi bajarilgan oliy ta’lim muassasasining ilmiy tadqiqot ishlarini rejalari bilan o‘zaro mosligi. Dissertatsiya ishi Toshkent kimyo-texnologiya instituti ilmiy tadqiqot ishlari rejalarning 38k/24-“Innovatsion ishlanma, texnologiya va loyihalar hamda ilmiy-texnik ishni yaratishni tijoratlashtirish” (2024-2026) mavzusidagi ilmiy-tadqiqot ishi doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi sanoat oqova suvlarini ion-almashinadigan smolalar yordamida tozalash jarayonini intellektual boshqarish modellari va algoritmlarini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

oqova suvlarni tozalash jarayonini boshqarishning zamonaviy holatini tahlil qilish hamda suv tozalash qurilmasini ishlab chiqish;

oqova suvlarni ion-almashinish smolalari orqali tozalash jarayonining matematik ifodasini tuzish hamda jarayonni imitatsion modellashtirish;

noaniqlik sharoitida jarayonning texnologik parametrlarini noqat’iy mantiqiy xulosa qilish orqali boshqarish tizimining sintezlash algoritmlarini ishlab chiqish;

oqova suvlarni tozalash jarayonining sun’iy neyron tarmoq va noqat’iy mantiqiy xulosalash orqali adaptiv neyro-noqat’iy mantiqiy boshqarish tizimining sintezlash algoritmlarini ishlab chiqish;

ishlab chiqilgan boshqarish modellari va algoritmlari asosida sanoat oqova suvlarini tozalash jarayonini avtomatlashtirilgan boshqarish tizimi va dasturiy majmuasini yaratishdan iborat.

Tadqiqotning obyekti sifatida sanoat korxonalaridan chiqayotgan oqova suvlarni tozalash jarayonining boshqarish tizimi olingan.

Tadqiqotning predmeti sanoat oqova suvlarini tozalash jarayonining texnologik parametrlarini intellektual boshqarish usullari, modellari va algoritmlari hisoblanadi.

Tadqiqot usullari: Tadqiqot jarayonida tizimli tahlil, avtomatik boshqarish nazariyasi, matematik modellashtirish, imitatsion modellashtirish hamda intellektual boshqarish usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

⁹ Марахимов А. Р. и др. Повышение обобщающей способности нейронных сетей и селекция обучающих выборок //Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2020. – №. 2. – С. 99-107.

sanoat oqova suvlarini ion-almashinish smolalari yordamida tozalash jarayonida suv qattiqligi va umumiy erigan minerallar miqdorining dinamik o'zgarishini aniqlik bilan bashorat qilish imkonini beruvchi stexiometrik matritsalar usuli asosida kinetik va imitatsion model ishlab chiqilgan;

noaniqlik va ma'lumotlar yetishmasligi sharoitida suv konsentratsiyasining tasodifiy o'zgaruvchanligi va kuzatiladigan tashqi ta'sirlarni inobatga olgan holda sanoat oqova suvlarini tozalash jarayonini noqat'iy mantiqiy xulosa usullari asosida intellektual boshqarish tizimini sintezlash algoritmlari ishlab chiqilgan;

dinamik obyekt xossalari va tashqi ta'sirlarning joriy vaqtdagi noaniqligi hamda ehtimoliy tabiatini inobatga olgan holda neyro-noqat'iy mantiqiy rostlagichning sozlash parametrlarini gibrid va metaevristik usullar asosida optimallashtirish algoritmlari ishlab chiqilgan;

jarayonning texnologik parametrlarini real vaqt rejimida monitoring qilish asosida chiqayotgan suv konsentratsiyasini belgilangan diapazonda barqaror ushlab turish va tizim energiya sarfini minimallashtirish imkonini beruvchi intellektual boshqarish tizimi taklif etilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

sanoat miqyosida ion-almashinish smolalari yordamida oqova suvlarni tozalash jarayonining kinetik modellari asosida imitatsion modeli ishlab chiqilgan;

texnologik jarayonning energiya va resurs tejamkorligini ta'minlash imkonini beruvchi boshqarish tizimining funksional sxemasi ishlab chiqilgan;

oqova suvlarni tozalash jarayonining texnologik parametrlarini optimal qiymatlarini ta'minlovchi raqamli boshqarish tizimi ishlab chiqilgan.

adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish usullarini qo'llash asosida oqova suvlarni tozalash jarayonining boshqariluvchi texnologik parametrlarini reglamentga mos ravishda ushlab turishni ta'minlovchi mikrokontrollerli boshqarish tizimi hamda dasturiy majmuasi ishlab chiqilgan.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqotning ishonchliligi dinamik obyektlarni intellektual boshqarishda noqat'iy mantiqiy hamda neyro noqat'iy mantiqiy boshqarish usullaridan to'g'ri foydalanilganligi, taklif etiladigan boshqarish modellari va algoritmlarining belgilangan darajada mosligi, aprotatsiya qilingan zamonaviy boshqarish nazariyasi usullarining qo'llanilishi, nazariy va amaliy tadqiqotlardan olingan natijalar va ularning o'zaro mosligi bilan asoslanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqotning natijalarining ilmiy ahamiyati nohiziqi va dinamik jarayonlarni noaniqlik sharoitida va tashqi tasirlarni hisobga olgan holda, adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy xulosalash usuli orqali boshqarish modellari hamda boshqarish tizimini sintezlash algoritmlarini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati sanoat oqova suvlarini tozalash jarayonining o'ziga xos xususiyatlarini hisobga olgan holda ion-almashinish smolalari orqali tozalash qurilmasini takomillashtirilgan adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish tizimini sintezlashning matematik va algoritmik ta'minotini yaratishdan iborat bo'lib, u dinamik va murakkab texnologik jarayonlarni raqamli boshqarish tizimini loyihalashning dasturiy vositasini ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi: Oqova suvlarni tozalash jarayonini intellektual boshqarish modellari va algoritmlarini sintezlash bo'yicha olingan natijalar asosida:

oqova suvlarni tozalash jarayonining texnologik parametrlarini optimal qiymatlarini ta'minlovchi raqamli boshqarish tizimi "ANVARJON BIZNES INVEST" AJda joriy qilingan ("O'zbekiston Respublikasi ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligi"ning 2025-yil 9-sentabrdagi 03-03/1-8990-son ma'lumotnomasi). Natijada, axborotlarni qayta ishlash vaqtini 1,2 % ga kamaytirish hisobiga, jarayonni boshqarishda natijalarni olish va qaror qabul qilishning tezligini 1,4 % ga oshirish imkonini bergan;

oqova suvlarni tozalash jarayonining boshqariluvchi texnologik parametrlarini reglamentga mos ravishda ushlab turishni ta'minlovchi mikrokontrollerli boshqarish tizimi hamda dasturiy majmuasi "ANVARJON BIZNES INVEST" AJda joriy qilingan ("O'zbekiston Respublikasi ekologiya, atrof-muhitni muhofaza qilish va iqlim o'zgarishi vazirligi"ning 2025-yil 9-sentabrdagi 03-03/1-8990-son ma'lumotnomasi). Natijada, energiya sarfini 1.2-2 % ga kamaytirish imkonini bergan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Mazkur tadqiqot natijalari, jumladan 4 ta xalqaro, 5 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida muhokamadan o'tkazilgan.

Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi. Dissertatsiya ishi mavzusi bo'yicha jami 17 ta ilmiy ish chop etilgan. Shundan Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 8 ta maqola, jumladan 6 tasi respublika va 2 tasi xorij (Scopus bazasiga kirgan) jurnallarida nashr etilgan. Elektron hisoblash mashinalari uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risidagi 2 ta guvohnoma olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya tarkibi kirish, to'rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 110 sahifani tashkil etadi.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiya ishining **kirish qismida** olib borilgan tadqiqotning dolzarbligi va ahamiyati asoslangan, maqsad va vazifalari belgilangan, tadqiqot obyekti va predmeti tavsiflangan, tadqiqotlarning O'zbekiston Respublikasi fan va texnika taraqqiyotining ustuvor yo'nalishlariga muvofiqligi ko'rsatilgan, ilmiy tadqiqotning yangiligi hamda amaliy natijalari, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan. Tadqiqot natijalarini amaliyotga tadbiq etish, chop etilgan ishlar va dissertatsiyaning tuzilishi to'g'risidagi ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiya ishining "**Oqova suvlarni tozalash jarayonini boshqarishning zamonaviy holati**" deb nomlangan birinchi bobida hozirgi kunda jahonda va Respublikamizda mavjud suv tozalash texnologiyalari, ularning turlari, kamchilik va ustun jihatlari, ion-almashinish smolalari yordamida oqova suvlarni tozalash, qurilmaning tuzilishi, ishlash prinsipi hamda olingan natijalar haqida yoritilgan. Bundan tashqari, ushbu bobda oqova suvlarni tozalash jarayonini avtomatik boshqarish usullari, an'anaviy va zamonaviy boshqarish turlari, boshqarishda noqat'iy mantiqiy

xulosa hamda adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy xulosa algoritmlaridan foydalanish haqida ma'lumotlar berilgan.

Oqova suvlarni tozalash jarayoni murakkab va energiya sarfi yuqori bo'lgan texnologik jarayonlardan biridir. Hozirgi kunda, dunyo miqyosida mavjud bo'lgan suv tozalash texnologiyalarining samaradorligi va energiya sarfini kamaytirish masalalari hali ham dolzarb muammolardan hisoblanadi. Suv sifatini yaxshilash va tozalash jarayonlarini takomillashtirish uchun intellektual boshqarish tizimlarining qo'llanilishi muhim ahamiyat kasb etadi. Turli ilmiy tadqiqotlar ushbu muammolarni hal etish maqsadida jarayonning matematik modellarini ishlab chiqish, sun'iy intellekt texnologiyalarini joriy etish va boshqarish tizimlarini takomillashtirishga e'tibor qaratmoqda. Oqova suvlarni tozalashda bug'latish, membranali texnologiyalar va ion-almashinish kabi usullar keng tarqalgan. Biroq, bu texnologiyalarning energiya sarfi yuqori, qurilma o'rnatish narxi baland va atrof-muhitga zararli ta'sirlari mavjud. Shuning uchun, yangi yondashuvlar va usullarni izlash, ayniqsa, sun'iy intellekt va adaptiv boshqarish tizimlarini qo'llash, bu muammolarni hal qilishda samarali bo'lishi mumkin.

Sun'iy neyron tarmoqlari va noqat'iy mantiq kabi intellektual boshqarish tizimlari, o'zining moslashuvchanligi va samaradorligi bilan e'tiborni tortadi. Bu tizimlar orqali jarayonlar real vaqt rejimida boshqarilishi, suvning konsentratsiyasini nazorat qilish va energiya sarfini kamaytirish imkoniyatlari mavjud. Misol uchun, sun'iy neyron tarmoqlari yordamida suv tarkibidagi turli parametrlar, masalan, suvning qattiqligi (Q) va suvdagi umumiy minerallar miqdori (TDS) darajasi, samarali boshqarilishi mumkin. Shuningdek, qurilma va boshqarish tizimlarini ishlab chiqilishda kamchiliklar ham mavjud. Masalan, modelning individual va moslashuvchan emasligi, turli tarkibli suv uchun modellarni qayta ishlab chiqish zaruratini shu turdagi kamchiliklar qatoriga qo'shish mumkin. Bunday muammolarni hal qilish uchun ilg'or texnologiyalar va usullarni birlashtirish va rivojlantirish zarur.

Umuman olganda, oqova suvlarni tozalash jarayonida innovatsion texnologiyalarni, xususan intellektual boshqarish tizimlarini qo'llash, nafaqat jarayon samaradorligini oshirish, balki atrof-muhit muhofazasi va iqtisodiy jihatdan samarali natijalar olishga ham yordam beradi. Bu sohada olib borilayotgan ilmiy ishlar, kelajakda suv resurslarini boshqarishda yangi yondashuvlar va texnologiyalarni yaratishga asos bo'lishi mumkin.

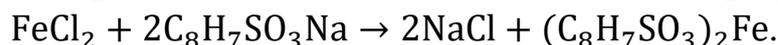
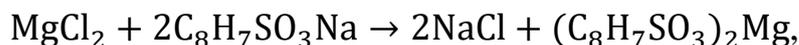
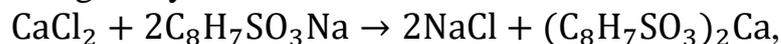
Yuqoridagilarni inobatga olgan holda, ushbu dissertatsiya ishi sanoat oqova suvlarini ion-almashinish smolalari yordamida tozalash jarayonini intellektual boshqarish modellari va algoritmlarini ishlab chiqishga qaratilgan.

Dissertatsiya ishining **“Oqova suvlarni ion-almashinish smolalari yordamida tozalash jarayonini modellashtirish”** deb nomlangan ikkinchi bobi oqova suvlarni ion-almashinish smolalari orqali tozalash jarayonini boshqarishda, jarayonning xususiyatlaridan kelib chiqqan holda uning matematik ifodasini topish, dinamik modellarini qurish hamda olingan matematik asoslarga ko'ra jarayonni kompyuter modellashtirishga, jarayonni intellektual boshqarish tizimi uchun neyro-noqat'iy boshqarish modellari va algoritmlarini ishlab chiqishga bag'ishlangan.

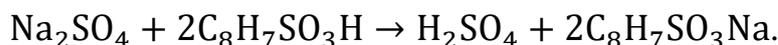
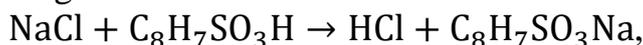
Ion-almashinish smolalari yordamida oqova suvlarni tozalash jarayoni

stexiometrik matritsalar usulida kinetik modellashtirish orqali tahlil qilingan. Tozalash jarayonida KU-2-8 kationit smolalari yordamida Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} kabi faol metall ionlari, AN-31 anionit smolalari yordamida esa xlorid Cl^- va sulfat SO_4^{2-} kabi ionlarni ushlab qoladi. Quyidagi yozilgan reaksiya tenglamalari asosida stexiometrik matritsalar usuli yordamida ion-almashinish smolalari filtridagi jarayonning matematik modeli ishlab chiqildi.

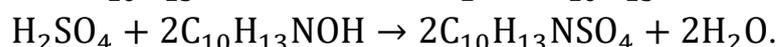
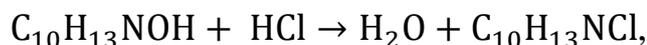
KU-2-8 kationitning natriy formasi uchun



KU-2-8 kationitning vodorod formasi uchun



AN-31 anionit uchun



Yuqoridagi kimyoviy reaksiyalardagi har bir komponentni x_i ko‘rinishda belgilab olindi:

x_1 – CaCl_2 – kalsiy xlorid;

x_2 – $\text{C}_8\text{H}_7\text{SO}_3\text{Na}$ – kationit (natriy forma);

x_3 – NaCl – natriy xlorid;

x_4 – $(\text{C}_8\text{H}_7\text{SO}_3)_2\text{Ca}$ – kalsiyni ushlab qolgan kationit;

x_5 – MgCl_2 – magniy xlorid;

x_6 – $(\text{C}_8\text{H}_7\text{SO}_3)_2\text{Mg}$ – magniyni ushlab qolgan kationit;

x_7 – FeCl_2 – temir xlorid;

x_8 – $(\text{C}_8\text{H}_7\text{SO}_3)_2\text{Fe}$ – temirni ushlab qolgan kationit;

x_9 – $\text{C}_8\text{H}_7\text{SO}_3\text{H}$ – kationit (vodorod forma);

x_{10} – HCl – vodorod xlorid;

x_{11} – Na_2SO_4 – natriy sulfat;

x_{12} – H_2SO_4 – sulfat kislota;

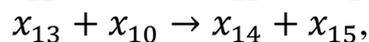
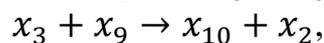
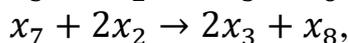
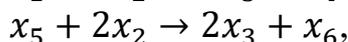
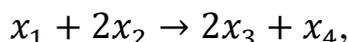
x_{13} – $\text{C}_{10}\text{H}_{13}\text{NOH}$ – anionit gidroksidi;

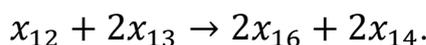
x_{14} – H_2O – suv;

x_{15} – $\text{C}_{10}\text{H}_{13}\text{NCl}$ – anionit xloridi;

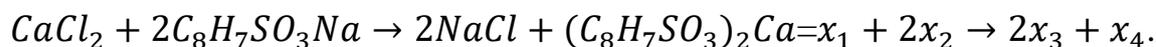
x_{16} – $\text{C}_{10}\text{H}_{13}\text{NSO}_4$ – anionit sulfat.

Kationit va anionit bilan to‘ldirilgan ion-almashinish texnologiyasini bir sistema deb hisoblandi hamda yuqoridagi belgilanishlardan foydalanib kimyoviy reaksiya quyidagi ko‘rinishda yozildi.





Reaksiyadagi komponentlarning o'zaro ta'sirlashish qonuniga asosan har bir bosqichning kimyoviy reaksiya tezliklari topildi. Ushbu jarayonda kimyoviy reaksiya qaytmas jarayon bo'lganligi uchun reaksiyaning faqat chap qismi yozib olindi. Misol uchun birinchi reaksiyada quyidagi belgilanish kiritib olindi.



Ion-almashinish smolalari yordamida suv tozalash qurilmasidagi tozalash filtri uchun moddiy balans tenglamasi tuzildi.

$$\frac{d(V^R x_i)}{dt} = G_i^\Sigma,$$

bu yerda, V^R –reaksiya borayotgan qurilma hajmi, m^3 , x_i –har bir komponentning vaqt bo'yicha konsentratsiyasi o'zgarishi, %, G_i^Σ –har bir komponentning kimyoviy reaksiya hisobiga intensivligi, t –reaksiya borish vaqti, s.

Yuqoridagi tenglamadan foydalanib qurilmadagi har bir komponentning konsentratsiyasi o'zgarishining matematik modeli quyidagi ko'rinishda ifodalandi. Ushbu kinetik model oqova suvlarni tozalash jarayonini boshqarish tizimini ishlab chiqish uchun zarur bo'lgan ilmiy asosni taqdim etadi. Model, jarayonning turli sharoitlarda qanday ishlashini oldindan bashoratlashga yordam beradi va oqova suvlarni ion-almashinish smolalari orqali tozalashning optimal texnologik rejimini aniqlash imkonini beradi. Ushbu ishlab chiqilgan kinetik model asosida jarayonning imitatsion modeli Matlab muhiti orqali shakllantirildi.

$$\frac{dCx_1}{dt} = -k_1 Cx_1 Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_2}{dt} = -2k_1 Cx_1 Cx_2^2 - 2k_2 Cx_5 Cx_2^2 - 2k_3 Cx_7 Cx_2^2 + k_4 Cx_3 C_9 + 2k_5 Cx_{11} Cx_9^2,$$

$$\frac{dCx_3}{dt} = 2k_1 Cx_1 Cx_2^2 + 2k_2 Cx_5 Cx_2^2 + 2k_3 Cx_7 Cx_2^2 - k_4 Cx_3 C_9,$$

$$\frac{dCx_4}{dt} = k_1 Cx_1 Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_5}{dt} = -k_2 Cx_5 Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_6}{dt} = k_2 Cx_5 Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_7}{dt} = -k_3 Cx_7 Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_8}{dt} = k_3 Cx_7 Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_9}{dt} = -k_4 Cx_3 C_9 - 2k_5 Cx_{11} Cx_9^2,$$

$$\frac{dCx_{10}}{dt} = k_4 Cx_3 C_9 - k_6 Cx_{13} C_{10},$$

$$\frac{dCx_{11}}{dt} = -k_5 Cx_{11} Cx_9^2,$$

$$\frac{dCx_{11}}{dt} = -k_5 Cx_{11} Cx_9^2,$$

$$\begin{aligned}\frac{dCx_{12}}{dt} &= k_5Cx_{11}Cx_9^2 - k_7Cx_{12}Cx_{13}^2, \\ \frac{dCx_{12}}{dt} &= k_5Cx_{11}Cx_9^2 - k_7Cx_{12}Cx_{13}^2, \\ \frac{dCx_{13}}{dt} &= -k_6Cx_{13}Cx_{10} - 2k_7Cx_{12}Cx_{13}^2, \\ \frac{dCx_{14}}{dt} &= k_6Cx_{13}Cx_{10} + 2k_7Cx_{12}Cx_{13}^2, \\ \frac{dCx_{15}}{dt} &= k_6Cx_{13}Cx_{10}, \\ \frac{dCx_{16}}{dt} &= 2k_7Cx_{12}Cx_{13}^2.\end{aligned}$$

Kompyuter modeli yordamida oqova suv konsentratsiyasining vaqt bo'yicha o'zgarish grafigi olindi. Natijada, ushbu model orqali oqova suvlarni tozalash jarayonida asosiy texnologik parametrlar ya'ni boshqaruvchi va boshqariluvchi parametrlar aniqlandi. Bundan tashqari ushbu bobda oqova suvlarni ion-almashinish smolalari yordamida tozalash jarayoni tizimli tahlil qilindi. Tizimli tahlil asosida asosiy jarayon hamda texnologik parametrlar aniqlanib, ushbu jarayonning dinamik modeli ishlab chiqildi. Model natijasida ushbu jarayonning asosiy boshqaruvchi parametrlari suvning qattiqligi (Q) hamda umumiy minerallar miqdori (TDS) hamda boshqariluvchi parametr esa kirayotgan oqova suvning sarfini boshqaruvchi klapaning ochilish darajasi (SerV) olindi.

Shundan so'ng, ushbu jarayonni adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish (ANFIS) modellari ishlab chiqildi. Bunda ANFIS arxitekturasining suv tozalash jarayoni uchun matematik ifodasi, neyron tarmoqlarni o'qitish hamda modelni parametrik optimallashtirish modellari ishlab chiqildi.

Dissertatsiya ishining **“Oqova suvlarni tozalash jarayonini intellektual boshqarish tizimini sintezlash algoritmlarini ishlab chiqish”** deb nomlangan uchinchi bobida jarayon uchun boshqarish tizimi tarkibini tanlash, ion-almashinuvchan smolalar yordamida oqova suvlarni tozalash jarayonida asosiy texnologik parametrlarni intellektual boshqarish uchun noqat'iy mantiqiy hamda adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish tizimini sintezlash algoritmlari hamda ANFIS parametrlarini gibril va metaevristik usullar orqali optimallashtirish algoritmlari keltirilgan.

Oqova suvlarni tozalash jarayonida qo'llanilgan ANFIS modeli neyron tarmoqlar va noqat'iy mantiqiy tizimlarning afzalliklarini o'zida mujassamlashtirib, kirish-chiqish munosabatlarini yuqori aniqlik bilan modellashtirish imkonini berdi. Modelni qurishda ikki xil asosiy parametrlar, nochizikli (premis) va chizikli (konsekvent) parametrlar tanlangan bo'lib, ular mos ravishda tegishlilik funksiyalari va Sugeno usulidagi chizikli tenglamalarning koeffitsientlarini ifodalaydi. Bunda chizikli parametrlar $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ gradienti hisoblanadi. Shundan so'ng nochizikli parametrlar tegishlilik funksiyasining markazi (c) va kengligi (σ) bo'yicha gradient hosilalari olinadi. Zanjir qoidasiga asosan hosila orqali yoziladi. Bunda, Gaus tegishlilik funksiyasi hosilasi ushbu quyidagi formula bilan ifodalanadi.

$$\frac{\partial \mu}{\partial c} = \mu(x, c, \sigma) \frac{x-c}{\sigma^2}, \quad \frac{\partial \mu}{\partial \sigma} = \mu(x, c, \sigma) \frac{(x-c)^2}{\sigma^3}.$$

Parametrlar yangilanishi gradient tushish qoidasi quyidagi formula bilan amalga oshiriladi.

$$\theta^{keyingi} = \theta^{oldingi} - \eta \frac{\partial E}{\partial \theta},$$

bu yerda, θ -parametrlar $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, c, \sigma)$, η -neyron tarmoqni o'qitish tezligi.

Neyron tarmoq o'qitilib, ANFIS modeli ishlab chiqilgandan so'ng bazida parametrlarni optimallashtirish yoki nozik sozlashga to'g'ri keladi. Ushbu tadqiqot ishida ham bir nechta optimallashtirish usullaridan foydalanildi. Zarralar to'dasini optimallashtirish (PSO) algoritmi shunday optimallashtirish usullaridan biri bo'lib, qushlar yoki baliqlarning guruh bo'lib harakatlanishidan ilhomlanib yaratilgan. Har bir zarrachada ikki parametr mavjud: tezlik va pozitsiya. Har bir iteratsiyada zarrachalar o'zining eng yaxshi topilgan holatini va butun populyatsiyaning eng yaxshi holatini hisobga olgan holda yangilanadi. Tezlik va pozitsiyani yangilash quyidagi maxsus tenglamalar orqali amalga oshadi.

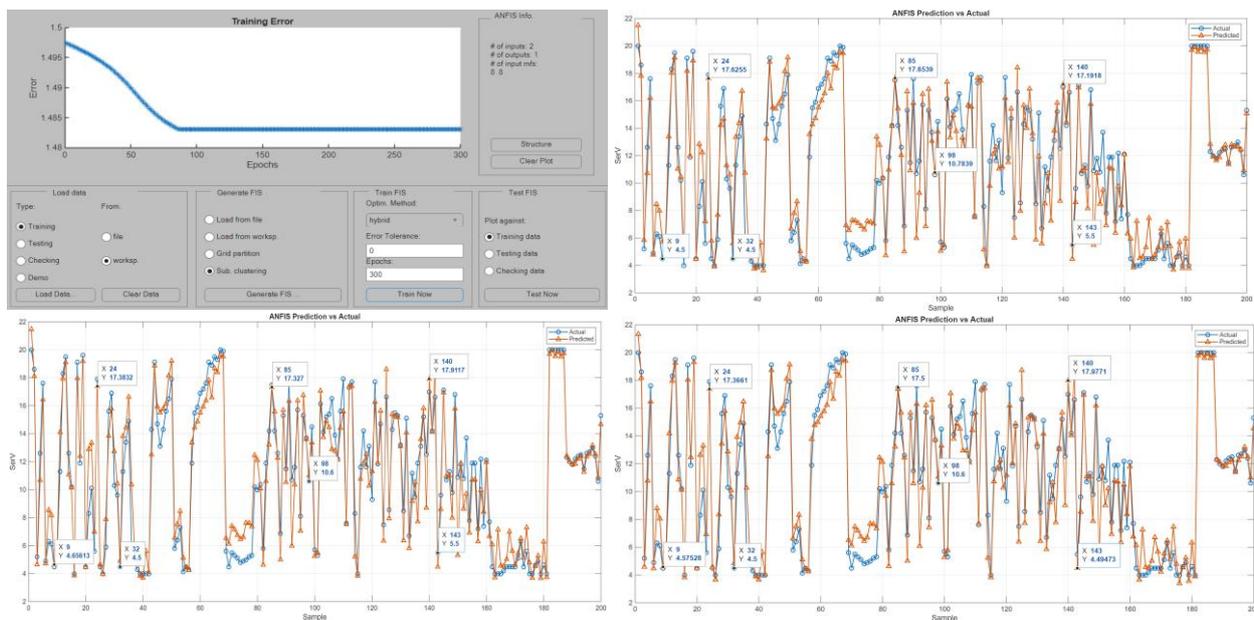
$$\begin{aligned} v_{ij}(k+1) &= \omega v_{ij}(k) + r_1 c_1 (p_i - x_{ij}(k)) + r_2 c_2 (g - x_{ij}(k)), \\ x_{ij}(k+1) &= x_{ij}(k) + v_{ij}(k+1), \end{aligned}$$

bu yerda, ω -inertsiya koeffitsienti, r_1, r_2 -tasodifiy sonlar, c_1, c_2 - tezlashtirish parametrlari. Zarrachalar harakatiga uchta omil ta'sir qiladi: joriy tezligi ($v_{ij}(k)$), o'zining eng yaxshi tajribasi yoki pozitsiyasi (p_i) va boshqa zarrachalardan o'rganilgan tajriba (g). Natijada butun to'da global optimal yechim tomon yaqinlashadi.

ANFIS modelini ishlab chiqishda 200 ta tajriba ma'lumotlari yordamida dastlab, Grid+Gibrid (Gradient tushish+eng kichik kvadratlar) va Sabtraktiv klasterlash (SC)+Gibrid usullari bilan o'qitildi. Grid asosida gibrid usuli bilan olib borilgan 100, 200 va 300 epoxli o'qitish amalga oshirildi va natijalar olindi. Model mosligini ifodalovchi asosiy metrikalar bo'lgan o'rtacha kvadratik xatolik (RMSE), o'rtacha absolut xatolik (MAE) va determinatsiya koeffitsienti (R^2) natijalari shuni ko'rsatdiki, model umumiy trendni aniq qayta tiklagan, ammo ayrim keskin o'zgarishlarda og'ishlar mavjud bo'lgan. 100 epoxda RMSE=1.5373, MAE =1.1409 va $R^2=0.9092$ ko'rsatkichlari qayd etilgan bo'lsa, 200 epoxda bu qiymatlar biroz yaxshilanib, RMSE=1.5224, MAE=1.1290 va $R^2=0.9109$ natijalari olingan. 300 epoxda ko'rsatkichlar deyarli o'zgarmagan, bu esa model 200 epoxdan keyin optimal o'rganishni yakunlaganini anglatadi.

Sabtraktiv klasterlash (SC) asosida Gibrid o'qitilgan ANFIS modelining 100, 200 va 300 epoxda o'qitilish natijalari 1-rasmda ifodalangan. Grafiklardan ko'rinadiki, model real qiymatlar bilan deyarli ustma-ust kelib, ayniqsa keskin o'zgarishlar yuz bergan oraliqlarda ham trendni sezilarli aniqlik bilan qayta tiklagan. 100 epoxda RMSE=1.5691 va $R^2=0.9054$ bo'lsa, 200 epoxda RMSE=1.4974, MAE=1.0979 va $R^2=0.9138$ natijalari qayd etilgan. 300 epoxda esa aniqlik yanada oshib, RMSE=1.4831, MAE=1.0920 va $R^2=0.9155$ qiymatlariga erishildi.

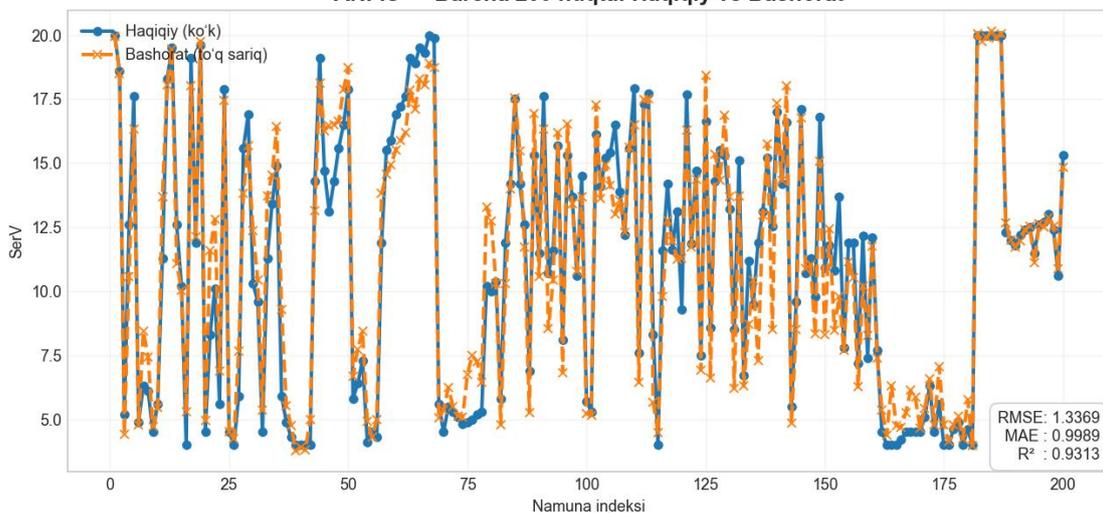
Bu jarayon epoxlar soni ortishi bilan modelning keskin dinamikalarini yanada yaxshi o'rganiganini ko'rsatadi. Shu sababli SC+Gibrid 300 epoxli modeli eng yaxshisi ekanligi aniqlandi.



1-rasm. SC+Gibrid usulida ANFIS modelini o‘qitish natijalari.

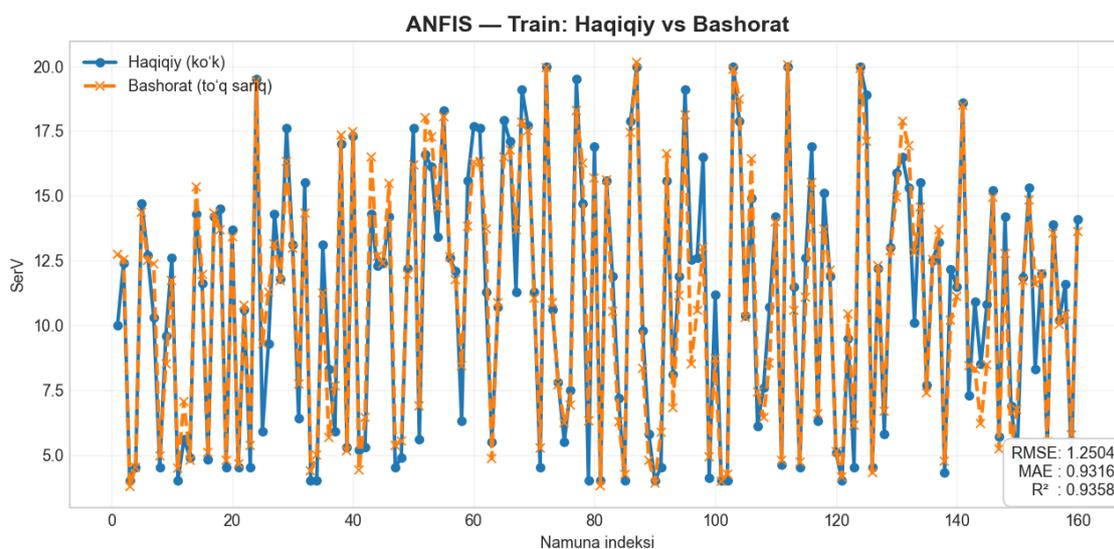
Model aniqligini yanada oshirish maqsadida bir nechta parametrik optimallashtirish algoritmlariga murojaat qilindi. Dastlab eng yaxshi natija ko‘rsatgan SC+Gibrid 300 epoxli model Matlab dasturida Zarralar to‘dasini optimallashtirish (PSO), Genetik algoritim (GA) usullari yordamida ketma-ket optimallashtirildi. Bu usullar lokal minimumlardan chiqib ketish, global yechimlarni topish va parametrlarni nozik sozlash imkoniga ega bo‘ldi. Lekin bu optimallashtirish biz kutganchalik darajada natija bermadi, ya’ni juda yuqori aniqlikka erishilmadi.

ANFIS — Barcha 200 nuqta: Haqiqiy vs Bashorat



2-rasm. Barcha ma’lumotlar uchun optimallashtirish natijalari grafigi.

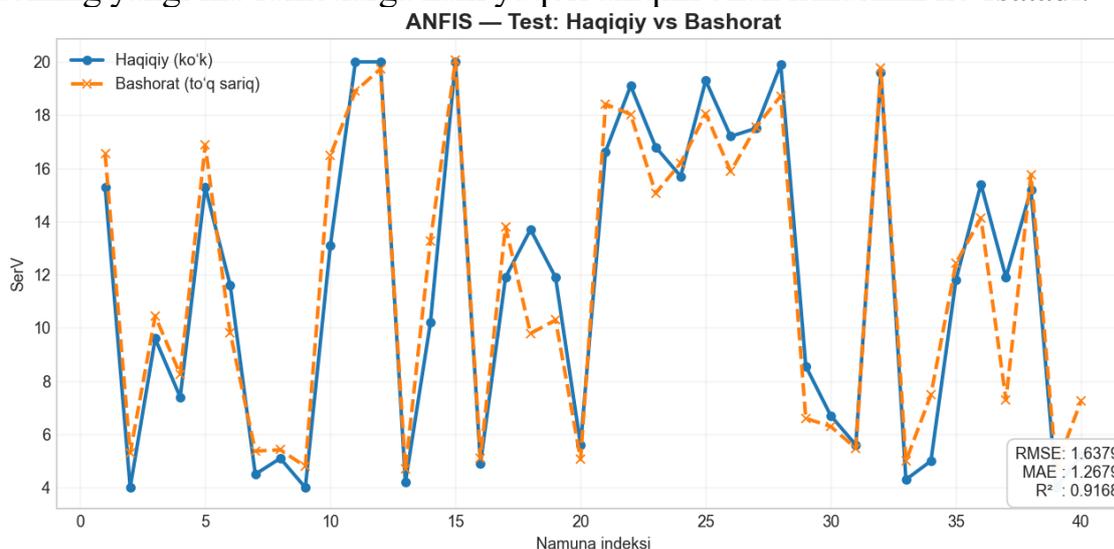
Shundan so‘ng, Python muhitida ANFIS parametrlarini zamonaviy usullar hisoblangan EKK, Adam, Boosting hamda Ensemble orqali optimallashtirish amalga oshirildi. Bu esa modelning umumlashtirish qobiliyatini sezilarli darajada oshirib, test bosqichida yuqori aniqlik ko‘rsatkichlariga erishishga olib keldi. Dastlab, barcha 200 ta ma’lumot bo‘yicha optimallashtirilgan model natijalari olindi va tahlil qilindi. 2-rasmda keltirilgan grafikda haqiqiy va bashorat qiymatlari deyarli ustma-ust tushib, RMSE=1.3369, MAE=0.9989 va R²=0.9313 teng metriks qiymatlari olindi. Bu modelning umumiy samaradorligi ancha yaxshilanganligini tasdiqlaydi.



3-rasm. O‘qitilgan ma’lumotlar uchun optimallashtirish natijalari grafigi.

O‘qitilgan ma’lumotlar (160 ta tajriba ma’lumoti) bo‘yicha natijalar keltirilib, haqiqiy va bashorat qiymatlar mos kelish grafigi keltirilgan (3-rasm). Bunda, $RMSE=1.2504$, $MAE=0.9316$ va $R^2=0.9358$ bo‘lib, model o‘qitilgan namunalarni mukammal o‘zlashtirganini ko‘rsatadi.

4-rasmda keltirilgan grafikda test ma’lumotlari asosida modelning umumlashtirish qobiliyati tekshirildi. Ayrim nuqtalarda kichik og‘ishlar mavjud bo‘lsada, natijalar ishonchli: $RMSE=1.6379$, $MAE=1.2679$ va $R^2=0.9168$. Bu modelning yangi ma’lumotlarga ham yuqori aniqlik bilan ishlashini ko‘rsatadi.



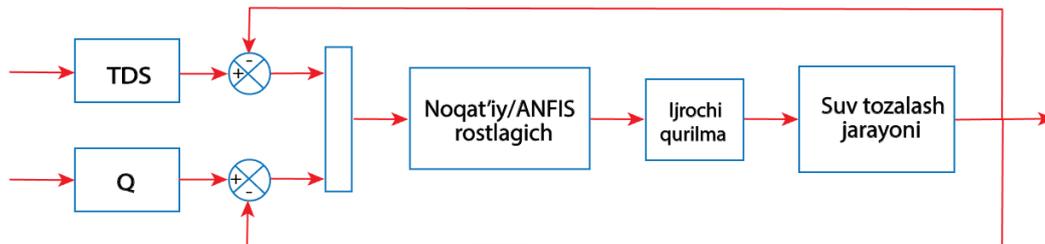
4-rasm. O‘qitilgan ma’lumotlar uchun optimallashtirish natijalari grafigi.

Optimallashtirilgan modelning korrelyatsiya koeffitsientlari hisoblanib tahlil qilindi. Bunda, o‘qitilgan uchun $R=0.96745$, validatsiya uchun $R=0.95206$, test uchun $R=0.95754$ va barcha ma’lumotlar uchun $R=0.96507$ qiymatlari qayd etilgan. Bu natijalar modelning nafaqat o‘qitilgan, balki sinov va validatsiya bosqichlarida ham barqaror ishlashini isbotladi.

Dissertatsiya ishining **“Ishlab chiqilgan intellektual boshqarish tizimi modellari va algoritmlarini oqova suvlarni tozalash jarayoniga qo‘llash”** deb nomlangan to‘rtinchi bobida oqova suvlarni tozalash jarayonining muhim texnologik

parametrlari, ya'ni qurilmadagi suv konsentratsiyasi va sarfini intellektual boshqarish modellari hamda noqat'iy mantiqiy hamda adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish tizimini sintezlash algoritmlarini haqiqiy jarayonga qo'llash natijalari keltirilgan. Shuningdek, ushbu bobda ishlab chiqilgan boshqarish tiziminining dasturiy majmuasini ishlab chiqish orqali real jarayonga realizatsiya qilish va jarayonni vizuallashtirish masalalari ko'rib chiqilgan.

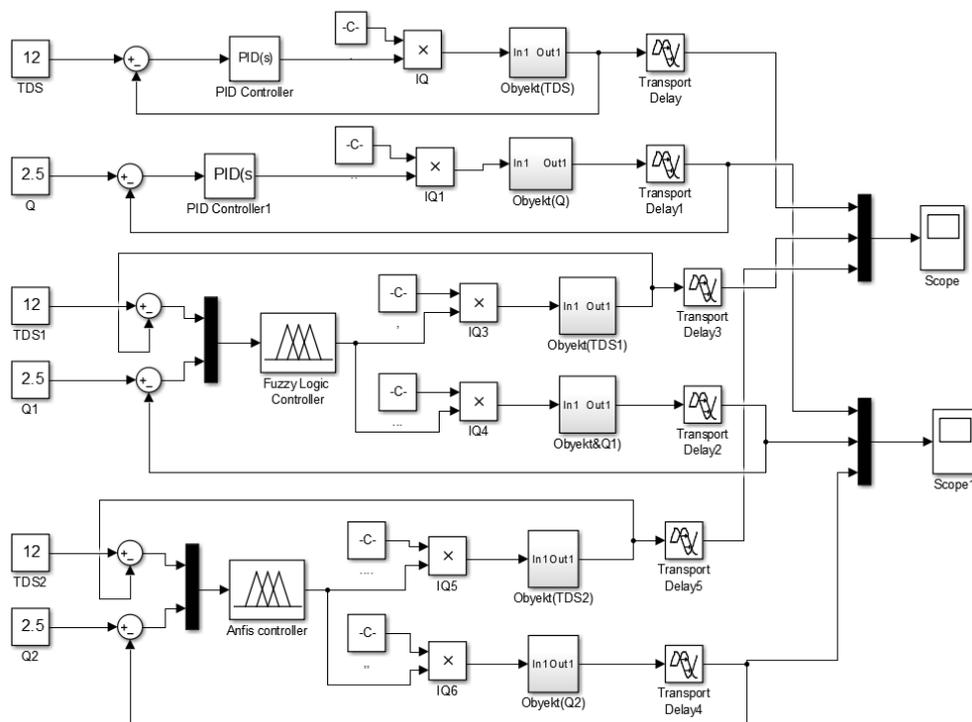
Uchinchi bobda ishlab chiqilgan noqat'iy mantiqiy boshqarish hamda ANFIS boshqarishning sintezlash algoritmlaridan hamda jarayonning xususiyatlaridan kelib chiqqan holda jarayonni intellektual boshqarish tizimi struktura sxemasi quyidagicha (5-rasm) shakllantirildi.



5-rasm. Oqova suvlarni intellektual boshqarish tizimi strukturasi.

Ushbu struktura sxemasi suv tozalash jarayonini yopiq kontur asosida intellektual boshqarishni ifodalaydi. O'rnatilgan qiymat bilan chiqish signali summatorida solishtirilib, xatolik $e(t)$ hosil qilinadi.

Ishlab chiqilgan noqat'iy mantiqiy va ANFIS boshqarish tizimlarini hamda an'anaviy PID boshqarish tizimlari bilan bitta struktura sxemasida shakllantirib taqqoslashni amalga oshiramiz (6-rasm). Bunda struktura sxemasi PID, noqat'iy mantiqiy hamda ANFIS ko'rinishida shakllantirildi.

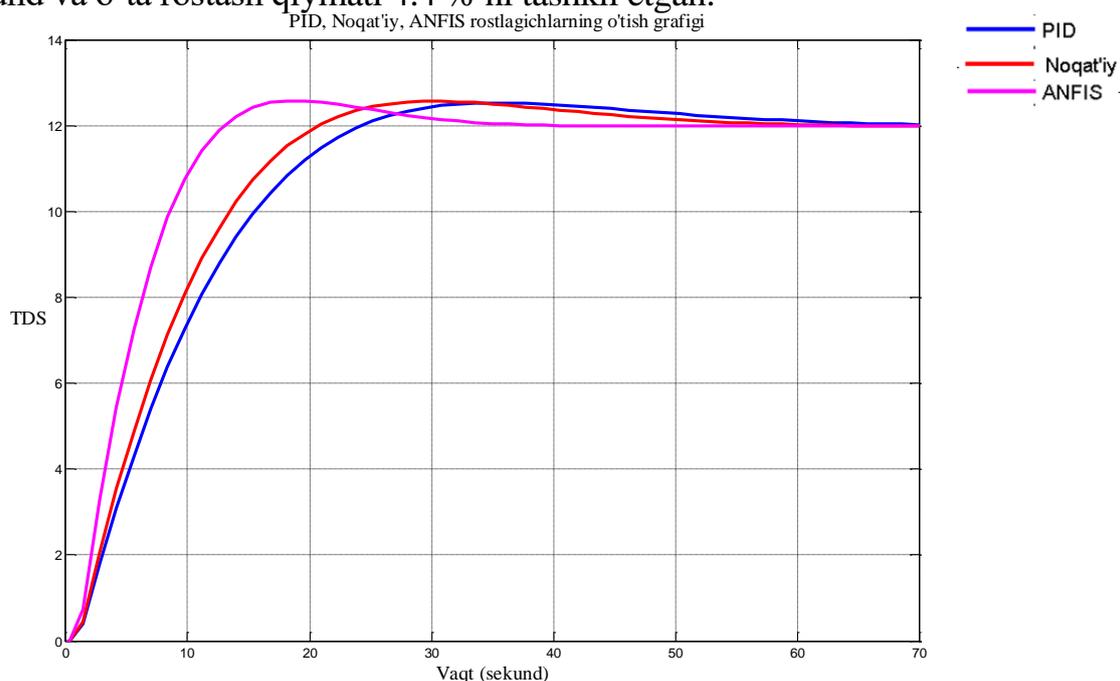


6-rasm. PID, Noqat'iy va ANFIS boshqarish tizimlari.

Yuqorida keltirilgan struktura sxemasi va 7-8-rasmlardagi o'tish grafiklari asosida oqova suvlarni tozalash jarayonida qo'llanilgan uchta boshqarish usullari klassik PID,

noqat'iy va ANFIS asosidagi boshqarish tizimlari chuqur tahlil qilindi. Bunda, umumiy erigan minerallar miqdori (TDS) hamda suvning qattiqligi (Q) asosiy kirish parametrlari bo'lib, chiqishda suvning umumiy konsentratsiyasi nazorat qilinmoqda. Grafikda uchala boshqarish usuli bo'yicha tizimning javobi yaqqol ko'rsatilgan: an'anaviy-PID boshqarishining grafigi ko'k chiziq bilan, noqat'iy boshqaruvi qizil chiziq bilan, va ANFIS boshqarishi pushti chiziq bilan ifodalangan.

Ushbu grafikda (8-rasm) TDS bo'yicha uchala usuldagi boshqarishning o'tish jarayoni bir xil obyekt va bir xil bosqichli kirish sharoitida solishtirildi. Grafiklardan ko'rinadiki, klassik PID ($K_p=1.01$, $K_i=0.11$, $K_d=0$) boshqarishda roslash vaqti va ko'tarilish vaqtlari biroz ko'proq: ko'tarilish vaqti 15.9 sekund, roslash vaqti 50.9 sekund va o'ta rostash qiymati 4.4 % ni tashkil etgan.

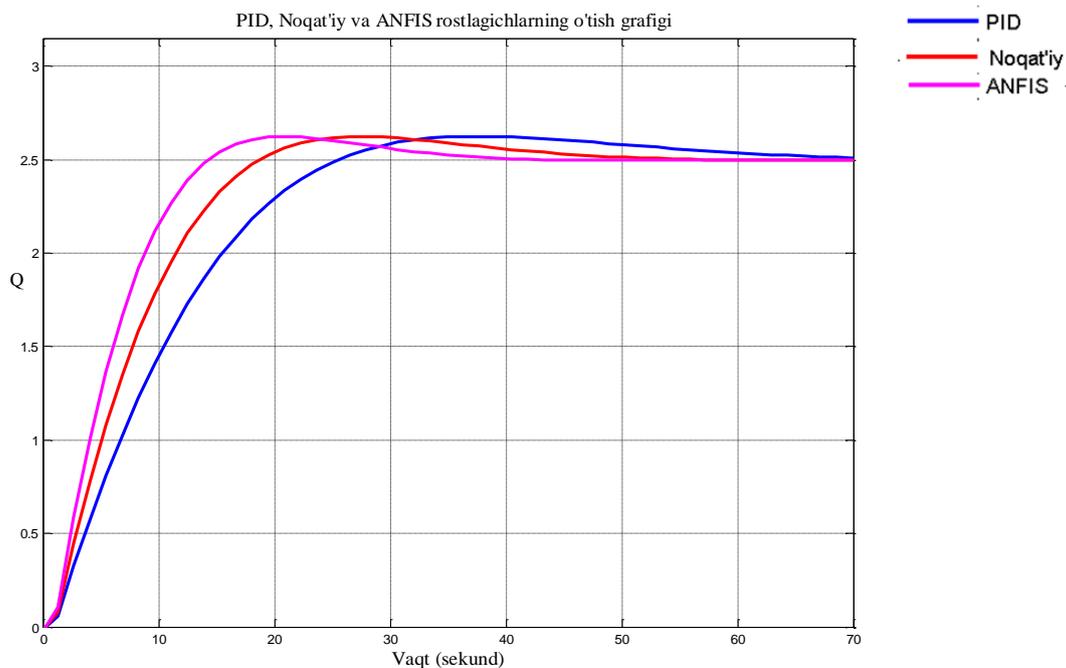


7-rasm. PID, Noqat'iy hamda ANFIS boshqarish tizimida TDS miqdorining o'tish grafigi.

Noqat'iy boshqarish tizimi javobni ancha barqaror qiladi. ko'tarilish vaqti 13.6 sekund, roslash vaqti 44.1 sekund va o'ta rostash qiymati 4.7 % ni tashkil qilmoqda. ANFIS boshqarish tizimi esa eng yaxshi va tezkor javobni beradi. Grafikdan ko'rinish mumkinki, ko'tarilish vaqti 8.31 sekund, roslash vaqti 27.1 sekund va o'ta rostash qiymati 4.8 % ni tashkil etgan.

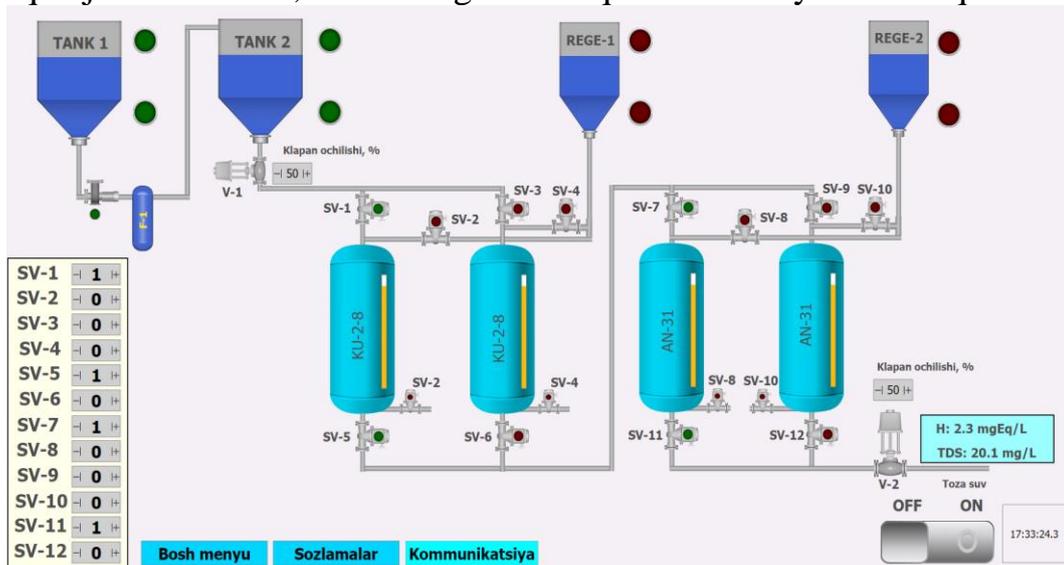
Bundan so'ng ushbu boshqarish tizimida suvning qattiqligi Q ning o'tish grafigi olindi. Quyidagi grafikda (8-rasm) Q bo'yicha uchala usuldagi boshqarishning o'tish jarayoni bir xil obyekt va bir xil bosqichli kirish sharoitida solishtirildi. Grafiklardan ko'rinadiki, klassik PID ($K_p=0.87$, $K_i=0.09$, $K_d=0$) boshqarishda xatolik va sakrashlar ko'p: ko'tarilish vaqti 17 sekund, roslash vaqti 55.8 sekund va o'ta rostash qiymati 5.01 % ni tashkil etgan.

Noqat'iy boshqarish tizimi javobni ancha barqaror qiladi. ko'tarilish vaqti 12.3 sekund, roslash vaqti 40.4 sekund va o'ta rostash qiymati 4.98 % ni tashkil qilmoqda. ANFIS boshqarish tizimi eng yaxshi va tezkor javobni beradi. Grafikdan ko'rish mumkinki, ko'tarilish vaqti 9.23 sekund, roslash vaqti 30.3 sekund va o'ta rostash qiymati 4.95 % ni tashkil etgan.



8-rasm. PID, Noqat'iy hamda ANFIS boshqarish tizimida Q miqdorining o'tish grafigi.

Oqova suvlarni ion-almashinish smolalari yordamida tozalash jarayonini avtomatlashtirilgan va intellektual boshqarish tizimi uchun mo'ljallangan dasturiy ta'minot majmuasi MasterSCADA 4D platformasida ishlab chiqilgan bo'lib (9-rasm), u real vaqt rejimida nazorat, monitoring va boshqarish imkoniyatlarini taqdim etadi.



9-rasm. Oqova suvlarni tozalash jarayonini boshqarish uchun SCADA tizimi.

Ushbu tizim SCADA texnologiyasiga asoslangan bo'lib, sanoat muhitidagi murakkab jarayonlarni yuqori aniqlikda boshqarish va tahlil qilish imkonini beradi. Grafik interfeys orqali TANK-1 va TANK-2 rezervuarlari, REGE-1 va REGE-2 regeneratsiya bloklari, KU-2-8 va AN-31 ion-almashinish ustunlari hamda SV-1 dan SV-12 gacha bo'lgan elektromagnit klapanlar va ularning servoklapandagi holati real vaqt rejimida aks ettiriladi. Foydalanuvchi tizim ishini kuzatishi, parametrlarni sozlashi va zarurat tug'ilganda tezkor boshqarishni amalga oshirishi mumkin. Suvning qattiqligi (Q) va umumiy erigan tuzlar (TDS) kirish parametrlar sifatida olinib, tozalash jarayonining asosiy boshqarish ko'rsatkichlarini tashkil qiladi.

XULOSA

Dissertatsiyada oqova suvlarni tozalash texnologiyasi hamda ushbu jarayonning tizimli tahlili, noqat'iy mantiqiy boshqarish va adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish asosida oqova suvlarni tozalash jarayonini boshqarish tizimini sintezlashning modellari va algoritmlari ishlab chiqildi. Tadqiqot nihoyasida quyidagi ilmiy natijalar olindi:

1. Ishlab chiqarish korxonalaridan chiqayotgan oqova suvlarni ion-almashinish smolalari orqali tozalash qurilmasi ishlab chiqilgan. Bu suv tozalashda energiya sarfini kamaytirish hamda oqova suvni istalgan konsentratsiyada tozalashni avtomatik boshqarish imkonini beradi.

2. Oqova suvlarni ion-almashinish smolalari yordamida tozalash jarayonining kinetik hamda imitatsion modellari ishlab chiqildi. Bu jarayonning texnologik parametrlarini intellektual boshqarish tizimini ishlab chiqish uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

3. Noaniqlik sharoitida oqova suvlarni tozalash jarayonidagi texnologik parametrlarni noqat'iy mantiqiy xulosa usuli orqali boshqarishning sintezlash algoritmlari ishlab chiqilgan. Bu suv tozalash jarayonidagi texnologik parametrlarni noqat'iy mantiqiy boshqarish tizimini ishlab chiqish uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

4. Olingan tajriba ma'lumotlari asosida sanoat oqova suvlarini ion-almashinish smolalari yordamida tozalash jarayonini adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish tizimini sintezlash algoritmlari ishlab chiqilgan. Bu orqali ushbu jarayonni intellektual boshqarish tizimini ishlab chiqishga imkon beradi.

5. Sanoat oqova suvlarini intellektual boshqarish uchun ishlab chiqilgan noqat'iy mantiqiy boshqarish tizimi va adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish tizimining dasturiy ta'minoti shakllantirildi. Ishlab chiqilgan dasturiy ta'minot yordamida jarayonni real vaqt rejimida nazorat qilish hamda boshqarish tizimini sanoatga realizatsiya qilish imkonini beradi.

6. Texnologik jarayonlarni boshqarishda noqat'iy mantiqiy xulosa va adaptiv neyro-noqat'iy mantiqiy xulosa algoritmlari asosida oqova suvlarni tozalash jarayonini intellektual boshqarish tizimi ishlab chiqilgan. Buni amaliyotga tadbqiq etish natijasida suvning konsentratsiyasini intellektual boshqarish imkonini beradi.

7. Ishlab chiqilgan noqat'iy mantiqiy hamda neyro-noqat'iy mantiqiy boshqarish modellari va algoritmlari sanoat oqova suvlarini tozalash jarayoniga joriy qilindi va olingan natijalar texnologik jarayonni intellektuallashtirish hisobiga oqova suvlarning sifat ko'rsatkichini oshirish hamda energiya sarfini kamaytirish imkonini beradi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.Т.03.02 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ
ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

ТАШКЕНТСКИЙ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЭШБОБАЕВ ЖАЛОЛИДДИН АБДУРАЗЗАКОВИЧ

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ОЧИСТКОЙ СТОЧНЫХ ВОД.**

**05.01.08- Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации доктора философии (PhD) по техническим наукам**

Ташкент – 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2024.3.PhD/T4873.

Диссертация выполнена в Ташкентском химико-технологическом институте.

Автореферат диссертации на трёх языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице (www.tdtu.uz) и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» (www.ziyounet.uz).

Научный руководитель: Хамидов Баходир Тажидинович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Мухитдинов Джалолиддин Пахритдинович
доктор технических наук, профессор

Алимова Гулчехра Рахимжоновна
доктор философии (PhD) по техническим наукам,
доцент

Ведущая организация: Каршинский государственный технический университет

Защита диссертации состоится « 20 » 12 2025 года в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета DSc 03/30.12.2019.T.03.02 при Ташкентском государственном техническом университете. (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел: (99871)207-07-32; факс: (99871) 207-14-64; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано № 60). (Адрес: 100095, г.Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (998971) 207-14-70)

Автореферат диссертации разослан « 6 » 12 2025 года.
(реестр протокола рассылки № 43 от « 6 » 09 2025 года.)



Н.Р.Юсупбеков

Председатель научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор, академик АН РУз

У.Ф.Мамиров

Ученый секретарь научного совета
по присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор

Х.З.Исамбердиев

Председатель научного семинара
при научном совете по присуждению ученых степеней,
д.т.н., профессор, академик АН РУз

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мире управление процессом распределения водных ресурсов и очисткой промышленных сточных вод рассматривается как один из ключевых факторов экологической и экономической устойчивости. Несмотря на то, что существующие технологии очистки достаточно развиты, вопросы повышения их энергоэффективности, снижения эксплуатационных затрат и обеспечения высокого качества очистки остаются актуальными. Состав сточных вод значительно варьируется в зависимости от отрасли промышленности, а изменчивость химических компонентов и динамический характер процесса требуют разработки энерго- и ресурсосберегающих очистных технологий, оснащённых интеллектуальными системами управления. В связи с этим рациональное использование водных ресурсов и управление процессами очистки сточных вод с применением интеллектуальных технологий рассматриваются как одно из перспективных направлений решения проблемы дефицита воды.

В мире внедрение интеллектуальных систем управления рассматривается как один из современных этапов автоматизации и цифровизации технологических процессов. В частности, в процессе очистки сточных вод разработка адаптивных нейро-нечётких алгоритмов управления на основе искусственного интеллекта признаётся одним из наиболее перспективных решений для повышения эффективности систем управления. Научно доказано, что такие системы обеспечивают мониторинг параметров процесса в режиме реального времени, компенсируют неопределённости, снижают энергопотребление и повышают качество очистки. В этом контексте разработка нечётких и нейро-нечётких систем управления технологическими параметрами процесса очистки сточных вод с использованием ионообменных смол является одной из важнейших задач.

В условиях нарастающего дефицита пресной воды в нашей стране важнейшими направлениями решения данной проблемы являются рациональное использование существующих водных ресурсов, широкое внедрение водосберегающих технологий, а также переработка сточных вод, что приобрело статус приоритета на уровне государственной политики. В частности, в направлении «Сбережение водных ресурсов и охрана окружающей среды» Стратегии развития «Узбекистан–2030»¹ предусмотрены такие задачи, как эффективное использование водных ресурсов, широкое применение водосберегающих технологий в сельском хозяйстве и промышленности, а также снижение объёмов сброса сточных вод в окружающую среду. Реализация указанных задач, в особенности снижение энергозатрат технологий переработки сточных вод, моделирование систем управления и их оптимизация на основе интеллектуальных подходов, является одной из важнейших задач современного этапа развития.

¹ Указ Президента Республики Узбекистан от 11 сентября 2023 года № УФ-158 «О Стратегии «Узбекистан-2030».

Закон Республики Узбекистан «О питьевом водоснабжении и водоотведении» № О‘РҚ-784 от 22 июля 2022 года, постановление Президента Республики Узбекистан № УП-107 от 1 апреля 2023 года «О неотложных мерах по повышению эффективности использования водных ресурсов», постановление № УП-145 от 1 марта 2022 года «О мерах по совершенствованию управления водными ресурсами на нижнем звене и регулированию отношений между водопотребителями», а также другие нормативно-правовые акты направлены на укрепление институциональной и правовой базы в данной сфере. Настоящая диссертационная работа в определённой степени способствует практической реализации указанных задач.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики Узбекистан IV «Развитие информатизации и информационно-коммуникационных технологий».

Степень изученности проблемы. В научно-технической литературе широко освещены сведения, посвящённые интеллектуализации процесса очистки сточных вод и разработке систем управления данным процессом. Анализ литературы показывает, что исследования в области интеллектуального управления технологическими процессами отражают степень изученности данной проблемы. Научные исследования, проводимые отечественными и зарубежными специалистами по управлению процессами переработки сточных вод, свидетельствуют о достижении значительных теоретических и практических результатов, при этом преимущественно используются классические методы управления. Ведущие научные центры и компании мира, такие как Veolia Environnement (Франция), Xylem Inc. (США), Siemens (Германия), Hitachi Aqua-Tech (Япония), международная лаборатория LIFE, организация Global Water Intelligence, а также высшие учебные заведения Массачусетский технологический институт (США), ETH Цюрих (Швейцария), Токийский университет (Япония) и Ташкентский химико-технологический институт вносят весомый вклад в развитие научных исследований и инновационных технологий в данной области.

В решении научных проблем, связанных с применением интеллектуальных технологий в управлении процессами переработки сточных вод, значительный вклад внесли зарубежные учёные Р.А. Алиев², Т. Фукуда, К. Ли, Доменико Курто³, Винченцо Францита⁴, Эдвард Джонс⁵, Манзур Кадир, В. Тасана и другие. В то же время, в разработку систем управления этими процессами на основе интеллектуальных технологий существенный вклад внесли и

² Zadeh, L.A.; Aliev, R.A. Fuzzy Logic Theory and Applications: Part I and Part II; World Scientific Publishing, 2018; USA, p.612

³ Judge, M.A.; Franzitta, V.; Curto, D.; Guercio, A.; Cirrincione, G.; Khattak, H.A. A Comprehensive Review of Artificial Intelligence Approaches for Smart Grid Integration and Optimization. *Energy Conversion and Management: X* 2024, Amsterdam, pp.2-27

⁴ D.Curto, V. Franzitta, A. Guercio: A review of the water desalination technologies. *Applied. Sciences* 2021. Basel. p.670

⁵ E. Jones, M. Qadir, M. T. H. Van Vliet, V. Smakhtin, and S. Kang, ‘The state of desalination and brine production: A global outlook’, *Sci. Total Environ.*, Mar. 2019, vol. 657, pp.1343–1356.

отечественные исследователи Н.Р. Юсупбеков⁶, Х.З. Игамбердиев⁷, И.Х. Сиддиқов⁸, М.А. Исмоилов, А.Р. Мараҳимов⁹, Ш.М. Гулямов, Д.Т. Мухамедиева, А.А. Артиков и другие.

Несмотря на достигнутые значительные научные результаты, в процессах переработки промышленных сточных вод по-прежнему остаются актуальными такие задачи, как повышение эффективности, снижение потребления ресурсов и энергии, а также минимизация негативного воздействия на окружающую среду. В данной диссертационной работе рассматривается интеллектуализация процесса очистки сточных вод с использованием ионообменных смол, в частности, разработка моделей и алгоритмов синтеза нечетких логических и адаптивных нейро-нечетких систем управления, направленных на снижение энергозатрат, минимизацию объёмов сточных вод и уменьшение вредного влияния на окружающую среду. Проведённые исследования в данном направлении обладают высокой научной и практической значимостью.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательского проекта Ташкентского химико-технологического института по теме №38к/24 «Коммерциализация инновационных разработок, технологий, проектов и научно-технических работ» (2024–2026 годы).

Целью исследования является разработка модели и алгоритмов интеллектуального управления процессом очистки промышленных сточных вод с использованием ионообменных смол.

Задачи исследования:

анализ современного состояния управления процессом очистки сточных вод и разработка установки для водоочистки;

построение математического описания процесса очистки сточных вод с использованием ионообменных смол и проведение имитационного моделирования;

разработка алгоритмов синтеза системы управления технологическими параметрами процесса в условиях неопределённости на основе нечеткого логического вывода;

разработка алгоритмов синтеза адаптивной нейро-нечеткой логической системы управления процессом очистки сточных вод с применением искусственных нейронных сетей и нечеткого логического вывода;

создание автоматизированной системы управления и программного комплекса для процесса очистки промышленных сточных вод на основе

⁶ Yusupbekov N. R., Igamberdiev H. Z., Mamirov U. F. Stable algorithms for adaptive control and adaptation of uncertain dynamic objects based on reference models //CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Т. 2965. – С. 296-302.

⁷ Igamberdiyev, H. Z., Yusupbekov, A. N., Zaripov, O. O., & Sevinov, J. U. (2017). Algorithms of adaptive identification of uncertain operated objects in dynamical models. Procedia computer science, 120, pp.854-861.

⁸ I.H. Sidikov, K.I. Usmanov, N.S. Yakubova. Synergetic control of nonlinear dynamic objects. «Chemical Technology. Control and Management». №2(92), 2020. Т. pp.44-55

⁹ Мараҳимов А. Р. и др. Повышение обобщающей способности нейронных сетей и селекция обучающих выборок //Проблемы вычислительной и прикладной математики. – 2020. – №. 2. – С. 99-107.

разработанных моделей и алгоритмов управления.

Объектом исследования является система управления процессом очистки сточных вод, образующихся на промышленных предприятиях.

Предметом исследования являются методы, модели и алгоритмы управления технологическим процессом очистки сточных вод промышленного производства.

Методы исследований. В процессе исследования использовались методы системного анализа, теории автоматического управления, математического моделирования, имитационного моделирования и интеллектуальных методов управления.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработаны кинетическая и имитационная модели на основе метода стехиометрических матриц, обеспечивающие высокоточное прогнозирование динамических изменений жесткости воды и общего содержания растворённых минералов в процессе очистки промышленных сточных вод с использованием ионообменных смол;

разработаны алгоритмы синтеза интеллектуальной системы управления процессом очистки промышленных сточных вод на основе методов нечеткого логического вывода, учитывающие условия неопределённости и неполноты исходных данных, стохастическую изменчивость концентрационных показателей и внешние возмущающие факторы;

разработаны алгоритмы оптимизации параметров настройки нейро-нечеткого логического регулятора, основанные на гибридных и метаэвристических методах, учитывающие текущую неопределённость и вероятностный характер свойств динамического объекта и внешних воздействий;

предложена интеллектуальная система управления, обеспечивающая поддержание концентрации очищенной воды в установленном диапазоне и минимизацию энергозатрат на основе мониторинга технологических параметров процесса в режиме реального времени.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

разработана имитационная модель процесса очистки сточных вод с использованием ионообменных смол на основе его кинетических моделей в промышленных условиях;

разработана функциональная схема системы управления, обеспечивающая энерго- и ресурсосберегающий характер технологического процесса;

разработана цифровая система управления, обеспечивающая поддержание оптимальных значений технологических параметров процесса очистки сточных вод;

разработана микроконтроллерная система управления и программный комплекс, обеспечивающие поддержание регулируемых технологических параметров процесса очистки сточных вод в соответствии с регламентом на основе применения адаптивных нейро-нечетких методов управления.

Достоверность результатов исследования. Надежность исследования

обоснована правильным применением нечетких логических и нейро-нечетких логических методов в интеллектуальном управлении динамическими объектами, соответствием предлагаемых моделей и алгоритмов управления установленным требованиям, использованием апробированных методов современной теории управления, а также согласованностью результатов, полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость полученных результатов заключается в разработке моделей управления и алгоритмов синтеза системы управления с использованием адаптивного нейро-нечёткого логического вывода для нелинейных и динамических процессов в условиях неопределённости и с учётом внешних воздействий.

Практическая значимость результатов исследования состоит в создании математического и алгоритмического обеспечения для синтеза усовершенствованной адаптивной нейро-нечёткой логической системы управления установкой очистки сточных вод с использованием ионообменных смол, с учётом специфики процесса очистки промышленных сточных вод. Это обусловлено разработкой программного инструмента для проектирования цифровых систем управления динамическими и сложными технологическими процессами.

Внедрение результатов исследования: На основе полученных результатов по синтезу интеллектуальных моделей и алгоритмов управления процессом очистки сточных вод внедрены:

цифровая система управления, обеспечивающая поддержание оптимальных значений технологических параметров процесса очистки сточных вод, внедрена на АО «ANVARJON BIZNES INVEST» (справка Министерства экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Узбекистан № 03-03/1-8990 от 9 сентября 2025 года). В результате за счёт сокращения времени обработки информации на 1,2 % удалось повысить скорость получения результатов и принятия решений при управлении процессом на 1,4 %;

микроконтроллерная система управления и программный комплекс, обеспечивающие поддержание регулируемых технологических параметров процесса очистки сточных вод в соответствии с регламентом, внедрены на АО «ANVARJON BIZNES INVEST» (справка Министерства экологии, охраны окружающей среды и изменения климата Республики Узбекистан № 03-03/1-8990 от 9 сентября 2025 года). В результате достигнуто снижение энергозатрат на 1,2–2 %.

Апробация результатов исследования: Результаты данного исследования были обсуждены на 4 международных и 5 республиканских научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования: По теме диссертационного исследования опубликованы 17 научных работ. Из них 8 статей были опубликованы в научных журналах, рекомендованных для публикаций Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан, включая 6 статьи в

республиканских и 2 статьи в зарубежных журналах (в том числе в журналах, индексируемых в базе Scopus). Также получены 2 сертификата о регистрации программного обеспечения для электронных вычислительных машин.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Объем диссертации составляет 110 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении диссертационной работы обоснована актуальность и значимость проведенного исследования, определены цель и задачи исследования, описаны объект и предмет исследования, показано соответствие исследования приоритетным направлениям науки и техники Республики Узбекистан, раскрыты новизна научного исследования и практическая значимость полученных результатов, а также научная и практическая ценность полученных результатов. Приведена информация о внедрении результатов исследования в практику, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе диссертационной работы под названием **«Современное состояние управления процессом очистки сточных вод»** рассматриваются текущие водные ресурсы в мире и нашей стране, ожидаемые проблемы с пресной водой, анализ состава сточных вод, технологии очистки воды, их виды, недостатки и преимущества, очистка сточных вод с использованием ионообменных смол, конструкция устройства, принцип работы и полученные результаты. Кроме того, в этой главе приведена информация об автоматизированных методах управления процессом очистки сточных вод, традиционных и современных типах управления, а также о применении моделей нечеткой логики и адаптивного нейро-нечеткого логического вывода в управлении.

Процесс очистки сточных вод является одним из наиболее сложных и энергоёмких технологических процессов. В настоящее время эффективность существующих технологий очистки воды и снижение энергопотребления остаются одними из наиболее актуальных мировых проблем. Применение интеллектуальных систем управления имеет важное значение для повышения качества воды и оптимизации процессов очистки. Различные научные исследования направлены на решение этих задач путём разработки математических моделей процессов, внедрения технологий искусственного интеллекта и совершенствования систем управления. В процессах очистки сточных вод широко применяются методы испарения, мембранные технологии и ионный обмен. Однако данные технологии отличаются высоким энергопотреблением, высокой стоимостью установки оборудования и оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Поэтому поиск новых подходов и методов, особенно на основе искусственного интеллекта и адаптивных систем управления, может стать эффективным решением данных проблем.

Интеллектуальные системы управления, такие как искусственные нейронные сети и нечеткая логика, привлекают внимание своей гибкостью и

эффективностью. С их помощью возможно управление технологическими процессами в реальном времени, контроль концентрации воды и снижение энергопотребления. Например, с использованием искусственных нейронных сетей можно эффективно управлять различными параметрами состава воды, такими как жёсткость (Q) и общее содержание растворённых минералов (TDS). В то же время при разработке оборудования и систем управления существуют определённые недостатки. К ним можно отнести ограниченную адаптивность и необходимость переработки моделей при изменении состава воды, что снижает универсальность решений. Для устранения подобных проблем необходимо интегрировать и развивать передовые технологии и методы, обеспечивающие более гибкое и интеллектуальное управление процессами очистки сточных вод.

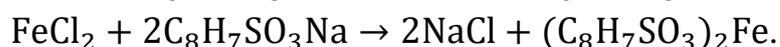
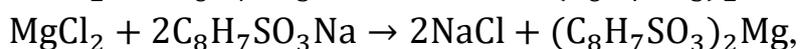
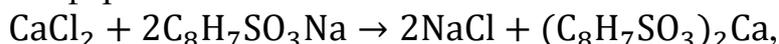
В целом применение инновационных технологий, в частности интеллектуальных систем управления, в процессе очистки сточных вод способствует не только повышению эффективности процессов, но и обеспечивает защиту окружающей среды, а также получение экономически выгодных результатов. Научные исследования, проводимые в данной области, могут стать основой для разработки новых подходов и технологий в управлении водными ресурсами в будущем.

С учётом изложенного, настоящая диссертационная работа направлена на разработку моделей и алгоритмов интеллектуального управления процессом очистки промышленных сточных вод с использованием ионообменных смол.

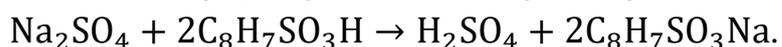
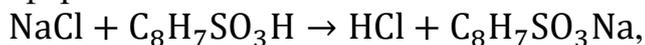
Вторая глава диссертационной работы, озаглавленная **«Моделирование процесса очистки сточных вод с использованием ионообменных смол»**, посвящена разработке математического описания процесса очистки сточных вод на основе особенностей его протекания, построению динамических моделей, а также компьютерному моделированию данного процесса на основе полученных математических зависимостей. Кроме того, глава ориентирована на разработку нейро-нечётких моделей и алгоритмов управления для интеллектуальной системы управления процессом очистки сточных вод.

Процесс очистки сточных вод с использованием ионообменных смол был проанализирован с помощью кинетического моделирования методом стехиометрических матриц. В процессе очистки катионитовые смолы КУ-2-8 удерживают активные металлические ионы, такие как Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , а анионитовые смолы AN-31 захватывают такие ионы, как хлорид Cl^- и сульфат SO_4^{2-} . На основе следующих уравнений реакций была разработана математическая модель процесса в ионообменных смолах фильтра с использованием метода стехиометрических матриц.

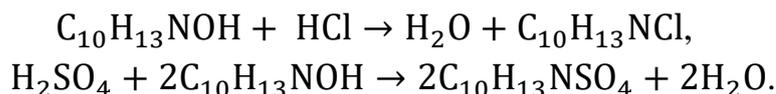
Для натриевой формы катионита КУ-2-8



Для водородной формы катионита КУ-2-8



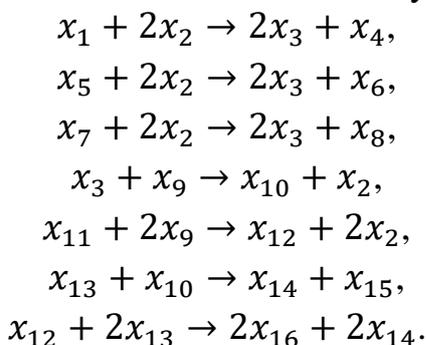
Для анионита AN-31



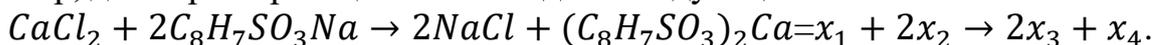
Каждый компонент в вышеуказанных химических реакциях был обозначен в виде x_i :

- x_1 – $CaCl_2$ – кальций хлорид;
- x_2 – $C_8H_7SO_3Na$ – катионит (натриевая форма);
- x_3 – $NaCl$ – натрий хлорид;
- x_4 – $(C_8H_7SO_3)_2Ca$ – катионит, удерживающий кальций;
- x_5 – $MgCl_2$ – магний хлорид;
- x_6 – $(C_8H_7SO_3)_2Mg$ – катионит, удерживающий магний;
- x_7 – $FeCl_2$ – железо хлорид;
- x_8 – $(C_8H_7SO_3)_2Fe$ – катионит, удерживающий железо;
- x_9 – $C_8H_7SO_3H$ – катионит (водородная форма);
- x_{10} – HCl – водород хлорид;
- x_{11} – Na_2SO_4 – натрий сульфат;
- x_{12} – H_2SO_4 – сульфатная кислота;
- x_{13} – $C_{10}H_{13}NOH$ – анионит гидроксид;
- x_{14} – H_2O – вода;
- x_{15} – $C_{10}H_{13}NCl$ – анионит хлорид;
- x_{16} – $C_{10}H_{13}NSO_4$ – анионит сульфат.

Ионно-обменная технология, заполненная катионитом и анионитом, была рассмотрена как единая система, и с использованием приведённых выше обозначений химическая реакция была записана в следующем виде.



На основе закона взаимодействия компонентов в реакции были определены химические скорости каждой стадии. В этом процессе, поскольку химическая реакция является необратимой, была записана только левая часть реакции. Например, для первой реакции была введена следующая запись:



Для фильтра очистки в установке для очистки воды с использованием ионообменных смол было составлено уравнение материального баланса:

$$\frac{d(V^R x_i)}{dt} = G_i^\Sigma,$$

где, V^R – объем устройства, в котором протекает реакция, m^3 , x_i – изменение концентрации каждого компонента в времени, %, G_i^Σ – интенсивность изменения количества каждого компонента за счёт химической реакции, t –

время протекания реакции, с.

На основе приведённого выше уравнения математическая модель изменения концентрации каждого компонента в аппарате была представлена в следующем виде. Данная кинетическая модель обеспечивает необходимую научную основу для разработки системы управления процессом очистки сточных вод. Модель позволяет заранее прогнозировать поведение процесса в различных условиях и определять оптимальный технологический режим очистки сточных вод с использованием ионообменных смол. На основе разработанной кинетической модели в среде Matlab была сформирована имитационная модель процесса.

$$\frac{dCx_1}{dt} = -k_1Cx_1Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_2}{dt} = -2k_1Cx_1Cx_2^2 - 2k_2Cx_5Cx_2^2 - 2k_3Cx_7Cx_2^2 + k_4Cx_3C_9 + 2k_5Cx_{11}Cx_9^2,$$

$$\frac{dCx_3}{dt} = 2k_1Cx_1Cx_2^2 + 2k_2Cx_5Cx_2^2 + 2k_3Cx_7Cx_2^2 - k_4Cx_3C_9,$$

$$\frac{dCx_4}{dt} = k_1Cx_1Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_5}{dt} = -k_2Cx_5Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_6}{dt} = k_2Cx_5Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_7}{dt} = -k_3Cx_7Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_8}{dt} = k_3Cx_7Cx_2^2,$$

$$\frac{dCx_9}{dt} = -k_4Cx_3C_9 - 2k_5Cx_{11}Cx_9^2,$$

$$\frac{dCx_{10}}{dt} = k_4Cx_3C_9 - k_6Cx_{13}Cx_{10},$$

$$\frac{dCx_{11}}{dt} = -k_5Cx_{11}Cx_9^2,$$

$$\frac{dCx_{11}}{dt} = -k_5Cx_{11}Cx_9^2,$$

$$\frac{dCx_{12}}{dt} = k_5Cx_{11}Cx_9^2 - k_7Cx_{12}Cx_{13}^2,$$

$$\frac{dCx_{12}}{dt} = k_5Cx_{11}Cx_9^2 - k_7Cx_{12}Cx_{13}^2,$$

$$\frac{dCx_{13}}{dt} = -k_6Cx_{13}Cx_{10} - 2k_7Cx_{12}Cx_{13}^2,$$

$$\frac{dCx_{14}}{dt} = k_6Cx_{13}Cx_{10} + 2k_7Cx_{12}Cx_{13}^2,$$

$$\frac{dCx_{15}}{dt} = k_6Cx_{13}Cx_{10},$$

$$\frac{dCx_{16}}{dt} = 2k_7Cx_{12}Cx_{13}^2.$$

С помощью компьютерного моделирования был получен график изменения концентрации сточных вод во времени. В результате с использованием данной модели были определены основные технологические параметры процесса очистки сточных вод – управляющие и управляемые параметры. Кроме того, в данной главе проведён системный анализ процесса очистки сточных вод с использованием ионообменных смол. На основе системного анализа были определены основные процессы и технологические параметры, а также разработана динамическая модель данного процесса. В результате моделирования установлено, что основными управляемыми параметрами

процесса являются жёсткость воды (Q) и общее содержание растворённых минералов (TDS), а в качестве управляющего параметра принято значение степени открытия клапана (SerV), регулирующего расход поступающих сточных вод.

После этого были разработаны модели адаптивного нейро-нечёткого логического управления (ANFIS) данным процессом. При этом для процесса очистки воды была построена математическая модель архитектуры ANFIS, а также разработаны модели обучения нейронной сети и параметрической оптимизации модели.

В третьей главе диссертационной работы, озаглавленной «**Разработка алгоритмов синтеза интеллектуальной системы управления процессом очистки сточных вод**», рассмотрены вопросы выбора структуры системы управления для данного технологического процесса. В главе представлены алгоритмы синтеза нечёткой логической и адаптивной нейро-нечёткой логической систем управления основными технологическими параметрами процесса очистки сточных вод с использованием ионообменных смол. Кроме того, разработаны и приведены алгоритмы оптимизации параметров ANFIS на основе гибридных и метаэвристических методов.

В процессе очистки сточных вод применённая модель ANFIS объединяет преимущества нейронных сетей и нечётких логических систем, что позволяет с высокой точностью моделировать взаимосвязи между входными и выходными параметрами. При построении модели были выбраны два основных типа параметров – нелинейные (премис) и линейные (консеквент), которые соответственно представляют функции принадлежности и коэффициенты линейных уравнений типа Сугено. При этом линейные параметры ($\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$) вычисляются с использованием градиентного метода. Далее для параметров предпосылок определяются частные производные по центру (c) и ширине (σ) функции принадлежности. В соответствии с правилом цепочки производная выражается через эти параметры. Производная функции принадлежности Гаусса записывается формулой:

$$\frac{\partial \mu}{\partial c} = \mu(x, c, \sigma) \frac{x-c}{\sigma^2}, \quad \frac{\partial \mu}{\partial \sigma} = \mu(x, c, \sigma) \frac{(x-c)^2}{\sigma^3},$$

Обновление параметров осуществляется по правилу градиентного спуска в соответствии со следующей формулой:

$$\theta^{\text{след}} = \theta^{\text{пред}} - \eta \frac{\partial E}{\partial \theta},$$

где θ параметры ($\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, c, \sigma$), η -скорость обучения нейронной сети.

Нейронная сеть была обучена, и после разработки модели ANFIS в ряде случаев возникает необходимость оптимизации или тонкой настройки параметров. В данном исследовании также были использованы несколько методов оптимизации. Один из таких методов – алгоритм оптимизации роя частиц (PSO), созданный по аналогии с коллективным поведением стай птиц или косяков рыб. Каждая частица характеризуется двумя параметрами: скоростью и позицией. На каждой итерации частицы обновляются с учётом как собственного наилучшего найденного состояния, так и глобально лучшего состояния всей

популяции. Обновление скорости и позиции осуществляется по специальным уравнениям:

$$v_{ij}(k + 1) = \omega v_{ij}(k) + r_1 c_1 (p_i - x_{ij}(k)) + r_2 c_2 (g - x_{ij}(k)),$$

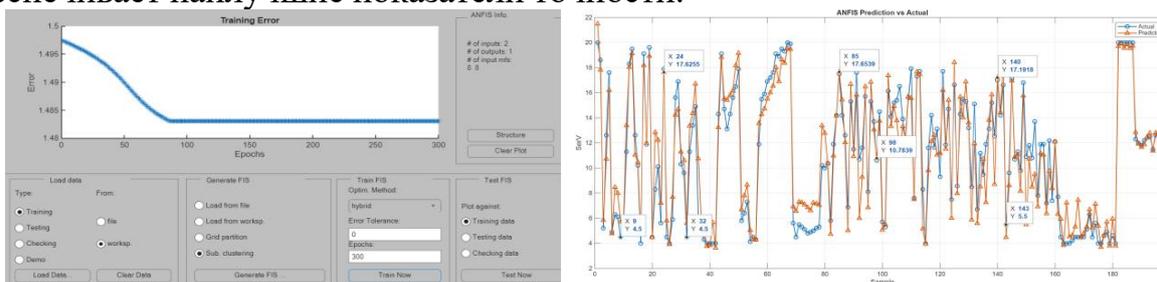
$$x_{ij}(k + 1) = x_{ij}(k) + v_{ij}(k + 1),$$

где ω - коэффициент инерции, r_1, r_2 - случайные числа, c_1, c_2 - коэффициенты ускорения. На движение частиц влияют три фактора: текущая скорость ($v_{ij}(k)$), собственный лучший опыт (p_i) и опыт, заимствованный у других частиц (g). В результате вся популяция стремится к глобально оптимальному решению.

При разработке модели ANFIS исходные данные, включающие 200 экспериментальных наблюдений, были использованы для предварительного обучения модели с применением методов Grid+гибрид (градиентный спуск + метод наименьших квадратов) и субтрактивной кластеризации (SC)+гибрид. Обучение по гибриднему методу на основе Grid было проведено для 100, 200 и 300 эпох, по результатам которых получены соответствующие показатели. Анализ основных метрик соответствия модели среднеквадратичной ошибки (RMSE), средней абсолютной ошибки (MAE) и коэффициента детерминации (R^2) показал, что модель корректно воспроизводит общий тренд, однако в отдельных точках с резкими изменениями наблюдаются отклонения. Для 100 эпох были получены значения $RMSE=1.5373$, $MAE=1.1409$ и $R^2=0.9092$; при 200 эпохах данные показатели несколько улучшились и составили $RMSE=1.5224$, $MAE=1.1290$ и $R^2=0.9109$. При 300 эпохах значения метрик практически не изменились, что свидетельствует о том, что модель завершила оптимальное обучение после достижения 200 эпох.

Результаты обучения модели ANFIS по гибриднему методу на основе субтрактивной кластеризации (SC) для 100, 200 и 300 эпох представлены на рисунке 1. Как видно из графиков, модель практически совпадает с реальными значениями и с высокой точностью воспроизводит тенденции, в том числе в участках с резкими изменениями. При 100 эпохах были получены значения $RMSE = 1.5691$ и $R^2 = 0.9054$; при 200 эпохах показатели улучшились и составили $RMSE=1.4974$, $MAE=1.0979$ и $R^2=0.9138$. При 300 эпохах точность модели возросла ещё больше, что подтверждается значениями $RMSE=1.4831$, $MAE=1.0920$ и $R^2 = 0.9155$.

Данный процесс показывает, что с увеличением числа эпох модель всё более эффективно обучается воспроизведению резких динамических изменений. В результате установлено, что модель SC+гибрид, обученная на 300 эпохах, обеспечивает наилучшие показатели точности.



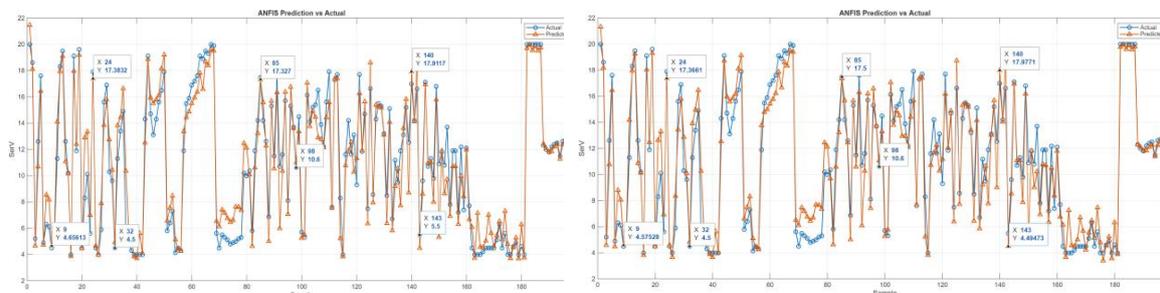


Рисунок 1. Результаты обучения модели ANFIS методом SC+гибрид.

Для повышения точности модели были применены несколько параметрических алгоритмов оптимизации. Наиболее успешная модель SC+гибрид (300 эпох) была последовательно оптимизирована в среде Matlab с использованием методов роя частиц (PSO) и генетического алгоритма (GA). Эти методы позволили улучшить поиск глобальных решений и выполнить тонкую настройку параметров, однако ожидаемого роста точности добиться не удалось.

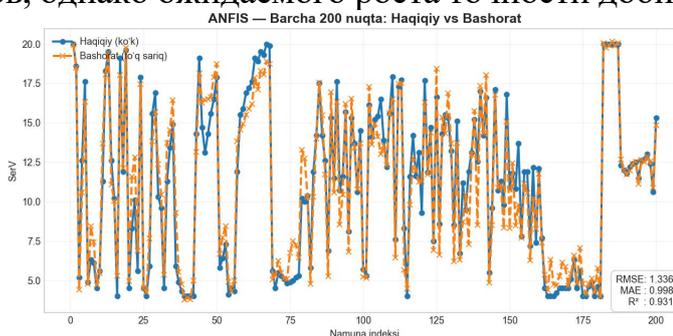


Рисунок 2. График результатов оптимизации для всех данных.

После этого в среде Python была выполнена оптимизация параметров ANFIS с применением современных методов MSE, Adam, Boosting и Ensemble. Это значительно повысило способность модели к обобщению и обеспечило высокую точность на этапе тестирования. На основе всех 200 экспериментальных данных были получены и проанализированы результаты оптимизированной модели. Как показано на рисунке 2, фактические и прогнозные значения практически совпадают; достигнуты метрики $RMSE = 1.3369$, $MAE = 0.9989$ и $R^2 = 0.9313$, что подтверждает улучшение общей эффективности модели.

Результаты, полученные на обучающем наборе данных (160 экспериментальных наблюдений), представлены на графике соответствия реальных и прогнозируемых значений (рисунок 3). При этом значения показателей составили: $RMSE=1.2504$, $MAE=0.9316$ и $R^2=0.9358$, что свидетельствует о том, что модель отлично усвоила обучающие выборки.

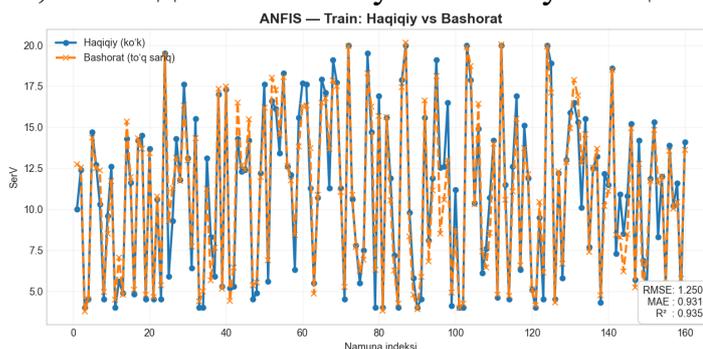


Рисунок 3. График результатов оптимизации для обучающих данных.

На графике, представленном на рисунке 4, проверена способность модели к обобщению на основе тестовых данных. Несмотря на наличие незначительных отклонений в отдельных точках, результаты считаются достоверными: $RMSE=1.6379$, $MAE=1.2679$ и $R^2=0.9168$. Это свидетельствует о том, что модель демонстрирует высокую точность и при работе с новыми данными.

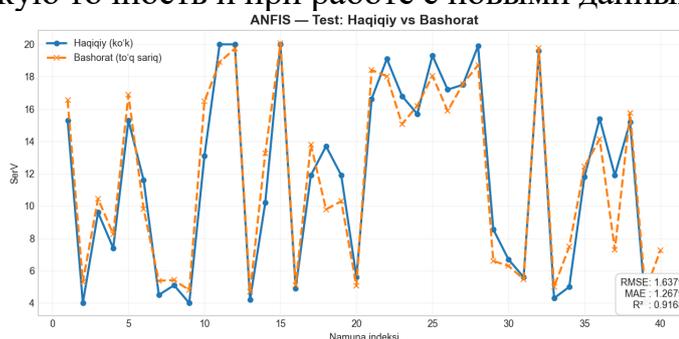


Рисунок 4. График результатов оптимизации для тестовых данных.

Для оптимизированной модели были рассчитаны и проанализированы коэффициенты корреляции. Получены следующие значения: $R=0.96745$ для обучающих данных, $R=0.95206$ для валидации, $R=0.95754$ для тестирования и $R=0.96507$ для всех данных в совокупности. Эти результаты подтверждают, что модель демонстрирует стабильную и надёжную работу не только на обучающем наборе, но также на этапах тестирования и валидации.

В четвёртой главе диссертационной работы «**Применение разработанных моделей и алгоритмов интеллектуальной системы управления к процессу очистки сточных вод**» представлены результаты применения методов, моделей и алгоритмов синтеза системы регулирования ключевых технологических параметров процесса очистки сточных вод – концентрации и расхода воды – в установке на основе нечёткого логического вывода и адаптивного нейро-нечёткого управления. Кроме того, в данной главе рассмотрены вопросы реализации разработанной системы управления в реальном процессе через создание программного комплекса и его визуализацию.

На основе алгоритмов синтеза нечёткого логического управления и ANFIS, разработанных в третьей главе, а также особенностей процесса была сформирована структурная схема автоматической системы управления (рис. 5).

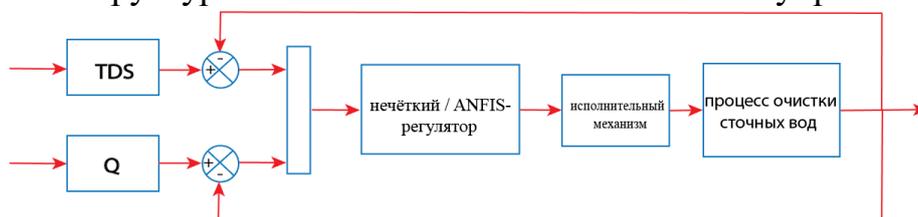


Рисунок 5. Структура интеллектуальной системы управления.

Данная структурная схема отражает интеллектуальное управление процессом очистки воды на основе замкнутого контура. Установленное значение сравнивается с выходным сигналом в сумматоре, в результате чего формируется ошибка $e(t)$. Разработанные нечёткие логические и ANFIS-системы управления, а также традиционные PID-системы управления были сформированы и сравнены в одной структурной схеме (рисунок 6). При этом структурная схема была

реализована в виде PID-, нечёткой логической и ANFIS-моделей.

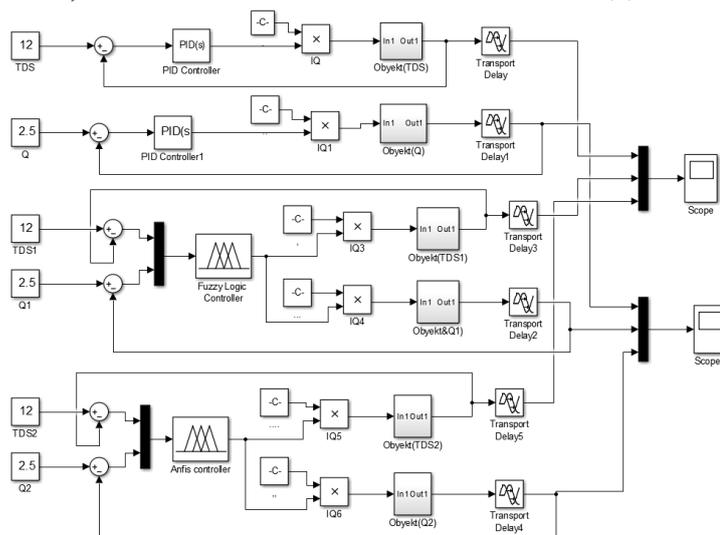


Рисунок 6. Системы управления PID, нечеткий и ANFIS.

На основе структурной схемы и переходных характеристик (рисунки 7-8) проведён сравнительный анализ трёх методов управления в процессе очистки сточных вод: классического PID-регулятора, нечёткого управления и системы ANFIS. Входными параметрами служили TDS и жёсткость воды (Q), а контролируемым выходным параметром-общая концентрация очищенной воды. На графиках показаны реакции системы: PID-синяя линия, нечёткое управление-красная, ANFIS-розовая.

На данном графике (рисунок 8) переходные процессы управления по параметру TDS для всех трёх методов были сопоставлены при одинаковом объекте и одинаковом ступенчатом воздействии. Как видно из графиков, при классическом PID-управлении ($K_p = 1.01$, $K_i = 0.11$, $K_d = 0$) время нарастания и время регулирования несколько выше: время нарастания составляет 15.9 с, время регулирования 50.9 с, а перерегулирование достигает 4.4 %.

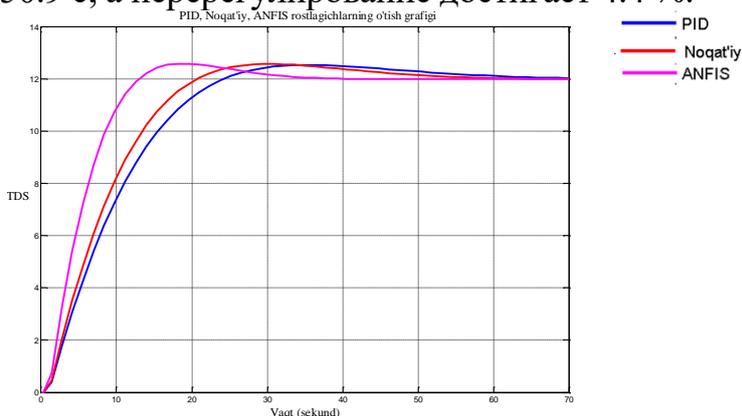


Рисунок 7. График переходного процесса изменения величины TDS в системах управления PID, нечеткой и ANFIS.

Нечёткая система управления обеспечивает более устойчивую реакцию: время нарастания составляет 13.6 с, время регулирования 44.1 с, а перерегулирование 4.7 %. Система управления на основе ANFIS демонстрирует наилучший и самый быстрый отклик: время нарастания 8.31 с, время регулирования 27.1 с и перерегулирование 4.8 %.

Далее для данной системы управления был получен переходный график по параметру жесткости воды Q . На рисунке 8 представлены переходные процессы для трёх методов управления при одинаковом объекте и одинаковом ступенчатом воздействии. Как показывают графики, при классическом PID-управлении ($K_p = 0.87$, $K_i = 0.09$, $K_d = 0$) наблюдаются значительные ошибки и колебания: время нарастания составляет 17 с, время регулирования 55.8 с, а перерегулирование достигает 5.01 %.

Нечёткая система управления обеспечивает более устойчивую реакцию: время нарастания составляет 12.3 с, время регулирования 40.4 с, а перерегулирование 4.98 %. Система управления на основе ANFIS демонстрирует наилучший и самый быстрый отклик: время нарастания 9.23 с, время регулирования 30.3 с и перерегулирование 4.95 %.

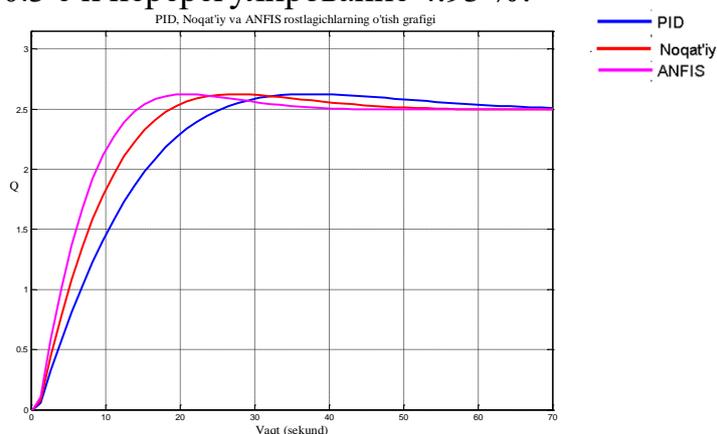


Рисунок 8. График переходного процесса изменения величины Q в системах управления PID, нечеткой и ANFIS.

Программный комплекс для автоматизированной и интеллектуальной системы управления процессом очистки сточных вод с использованием ионообменных смол разработан на платформе MasterSCADA 4D (рис. 9) и обеспечивает контроль, мониторинг и управление в реальном времени.

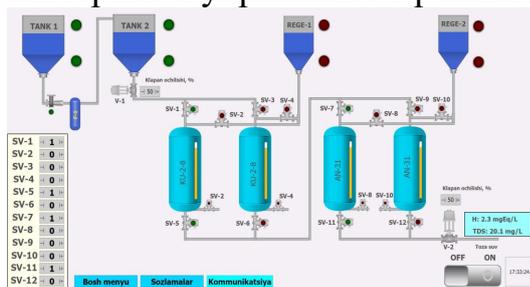


Рисунок 9. SCADA-система для управления процессом очистки сточных вод.

Система, основанная на технологии SCADA, обеспечивает точное управление и мониторинг сложных промышленных процессов. В реальном времени на графическом интерфейсе отображаются резервуары TANK-1, TANK-2, блоки регенерации REGE-1, REGE-2, ионообменные колонны KU-2-8 и AN-31, а также электромагнитные клапаны SV-1–SV-12 с положением сервоприводов. Пользователь может наблюдать работу системы, изменять параметры и при необходимости выполнять оперативное управление. Основными входными параметрами являются жёсткость воды (Q) и концентрация растворённых солей (TDS), определяющие процесс очистки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработана технология очистки сточных вод и выполнен системный анализ данного процесса, а также созданы модели и алгоритмы синтеза системы управления процессом очистки сточных вод на основе нечёткого логического управления и адаптивного нейро-нечёткого логического управления. По итогам исследования получены следующие научные результаты:

1. Разработана установка для очистки сточных вод, поступающих от промышленных предприятий, на основе ионообменных смол. Данная установка позволяет снизить энергопотребление и обеспечить автоматическое регулирование степени очистки до требуемой концентрации.

2. Разработаны кинетическая и имитационная модели процесса очистки сточных вод с использованием ионообменных смол. Эти модели служат научной основой для построения интеллектуальной системы управления технологическими параметрами процесса.

3. Разработаны алгоритмы синтеза нечёткой логической системы управления технологическими параметрами процесса очистки сточных вод в условиях неопределённости. Указанные алгоритмы обеспечивают основу для построения системы нечёткого логического управления данным процессом.

4. На основе полученных экспериментальных данных разработаны алгоритмы синтеза адаптивной нейро-нечёткой логической системы управления процессом очистки сточных вод с использованием ионообменных смол. Это обеспечивает возможность разработки интеллектуальной системы управления данным процессом.

5. Созданы программные средства нечёткой логической системы управления и адаптивной нейро-нечёткой логической системы управления для интеллектуального управления сточными водами. Разработанное программное обеспечение позволяет осуществлять мониторинг и управление процессом в режиме реального времени, а также внедрять систему в промышленную эксплуатацию.

6. Разработана интеллектуальная система управления процессом очистки сточных вод на основе алгоритмов нечёткого логического вывода и адаптивного нейро-нечёткого логического вывода. Внедрение данной системы обеспечивает возможность интеллектуального регулирования концентрации очищенной воды.

7. Разработанные модели и алгоритмы нечёткого и нейро-нечёткого логического управления внедрены в технологический процесс очистки сточных вод. Полученные результаты подтверждают повышение качества очищенной воды и снижение энергозатрат за счёт интеллектуализации технологического процесса.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/30.12.2019.T.03.02
ON THE ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE
TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

TASHKENT INSTITUTE OF CHEMICAL TECHNOLOGY

ESHBOBAEV JALOLIDDIN ABDURAZZAKOVICH

**METHODS AND ALGORITHMS OF INTELLIGENT CONTROL OF THE
WASTEWATER TREATMENT PROCESS**

05.01.08 - Automation and control of technological processes and manufactures

**DISSERTATION ABSTRACT
of doctor of philosophy (PhD) on technical sciences**

Tashkent – 2025

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme attestation Commission at the Ministry of Higher Education, Science and Innovations of the Republic of Uzbekistan under number B2024.3.PhD/T4873.

The dissertation has been prepared at Tashkent institute of chemical technology.

The abstract of dissertation is posted in Three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) is placed on the web-page of Scientific Council (www.tdtu.uz) and Information and Educational Portal «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Scientific adviser: **Khamidov Bakhodir Tajiddinovich**
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Official opponents: **Mukhitdinov Jaloliddin Pakhritdinovich**
Doctor of Technical Sciences, Professor
Alimova Gulchekhra Rakhimjonovna
Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences, Associate Professor

Leading organization: **Karshi state technical university**

Defense of dissertation will take place in «20» 12 2025 at 10⁰⁰ o'clock at a meeting of the scientific council DSc.03/30.12.2019.T.03.02 at the Tashkent state technical university (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (+99871) 207-07-32; fax: (+99871) 207-14-64; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number № 60). (Address: 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (+99871) 207-14-70).

Abstract of dissertation sent out on «6» 12 2025 year.
(mailing report № 43, on «6» 09 2025 year).



N.R. Yusupbekov
Chairman of scientific council
on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor, academician

U.F. Mamirov
Scientific secretary of scientific council,
on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor

Kh.Z. Igamberdiev
Chairman of the academic seminar under the
Scientific council on awarding scientific degrees,
doctor of technical sciences, professor, academician

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research is to develop intelligent control models and algorithms for the process of industrial wastewater treatment using ion-exchange resins.

The object of the research work is the control system of the wastewater treatment process from industrial enterprises.

The scientific novelty of the research work:

a kinetic and simulation model based on the stoichiometric matrix method has been developed to accurately predict the dynamic variations in water hardness and total dissolved solids during the process of industrial wastewater treatment using ion-exchange resins;

algorithms for synthesizing an intelligent control system for the industrial wastewater treatment process have been developed based on fuzzy logical inference methods, taking into account the stochastic variability of concentration levels, external disturbances, and the uncertainty and incompleteness of available data;

algorithms for optimizing the tuning parameters of a neuro-fuzzy controller have been developed using hybrid and metaheuristic methods, considering the real-time uncertainty and probabilistic nature of the dynamic object and external influences;

an intelligent control system has been proposed that ensures stable maintenance of the outlet water concentration within a specified range and minimization of energy consumption, based on real-time monitoring of technological parameters of the process.

Implementation of research results. Based on the results obtained from the synthesis of intelligent control models and algorithms for the wastewater treatment process:

A digital control system ensuring the optimal values of the technological parameters of the wastewater treatment process has been implemented at JSC “ANVARJON BIZNES INVEST” (according to the certificate of the Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Uzbekistan No. 03-03/1-8990 dated September 9, 2025). As a result, due to a 1.2% reduction in information processing time, the speed of obtaining results and making decisions in process control increased by 1.4%;

a microcontroller-based control system and software package ensuring the maintenance of regulated technological parameters of the wastewater treatment process in accordance with the set standards have been implemented at JSC “ANVARJON BIZNES INVEST” (according to the certificate of the Ministry of Ecology, Environmental Protection and Climate Change of the Republic of Uzbekistan No. 03-03/1-8990 dated September 9, 2025). As a result, energy consumption was reduced by 1.2–2%.

The structure and scope of the dissertation. The content of the dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a bibliography and annexes. The volume of the thesis is 110 pages.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (Част I; Part I)

1. Eshbobaev J.A., Norkobilov A.T., Turakulov Z.S., Khamidov B.T., Kodirov O.Sh. Field Trial of Solar-Powered Ion-Exchange Resin for the Industrial Wastewater Treatment Process // Engineering Proceedings, Basel, Switzerland. 2023, 37, 47, pp.2-7. (3, Scopus, CS=1.2)

2. Eshbobayev J.A., Xamidov B.T., Qodirov O.Sh. Development of the computer model of the waste water treatment process using ion-exchange resins in the Matlab program // Chemical technology, Control and management. Tashkent, 2023, №4 (112) pp.63-69. (05.00.00, №12)

3. Eshbobayev J.A. Ion-almashinish smolalari yordamida oqova suvlarni tozalash jarayonini matematik modellashtirish // Muhammad al-xorazmiy avlodlari” 3(24)2023, Toshkent, 223-227 b. (05.00.00 №10)

4. Eshbobayev J.A., Ungarov S.A., Farxadova S.I. Sanoat oqova suvlarini quyosh energiyasi bilan ishlaydigan ion almashinadigan smolalar texnologiyasida tozalash // Central Asian Food Engineering and Technology. Toshkent, volume 1, issue 4, 2023. ISSN: 2181-385X, 2-10 b. (OAK Rayosatining 2023 yil 28 fevraldagi 333/5-son qarori)

5. Eshbobaev J.A., Norkobilov A.T., Usmanov K.I., Khamidov B.I., Kodirov O.Sh., Avezov T.A. Control of Wastewater Treatment Processes Using a Fuzzy Logic Approach // Engineering Proceedings, Basel, Switzerland, 2024, 67(1), 39, pp.2-8 (3, Scopus, CS=1.2)

6. Eshbobayev J.A. Oqova suvlarni tozalash jarayonini noqat'iy mantiq asosida boshqarish modelini ishlab chiqish // Ilm-fan va innovatsion rivojlanish. Toshkent, 7-jild/2-2024, 72-82 b. (OAK Rayosatining 2019 yil 28 fevraldagi 262/9.2-son qarori)

7. Eshbobaev J.A., Khamidov B.T., Fallanza M.T., Turakulov Z.S., Farxadova S.I. Application of an adaptive neuro-fuzzy inference system to control the wastewater treatment process // Chemical Technology, Control and Management, Tashkent, 2025(1), pp.52–60. (05.00.00, №12)

8. Eshbobayev J.A., Xamidov B.T., Usmanov K.I. Oqova suvlarni tozalash jarayonini intellektual boshqarish tizimi va dasturiy ta'minotini ishlab chiqish // Ilm-fan va innovatsion rivojlanish. Toshkent, 8-jild /2-2025, 25-34 b. (OAK Rayosatining 2019 yil 28 fevraldagi 262/9.2-son qarori)

II bo'lim (Част II; Part II)

1. Eshbobayev J.A., Norqobilov A.T., Xamidov B.T., Qodirov O.Sh., Elmanov A.B., Baxtiyorov A.B. Design of desalination process parameters for brackish water treatment / Ist-International Congress on Modern Sciences, Tashkent, 2022, pp.273-279.

2. Eshbobayev J.A., Yusupov M.J., Safarov O'.J. Oqova suvlarni membrana texnologiyasi yordamida tozalash usullari va tahlili / «Umidli kimyogarlar-2022» XXXI - ilmiy-texnikaviy anjumanining maqolalar to'plami. Toshkent, 234-235 b.

3. Baxtiyorov A.N., Norqobilov A.T., Eshbobayev J.A. Sho'rlangan suvlarni tuzsizlantirish jarayonini modellashtirish / «Umidli kimyogarlar-2022» XXXI - ilmiy-texnikaviy anjumanining maqolalar to'plami, Toshkent, 398-399 b.

4. Eshbobayev J.A., Kamolov A.B., Turaqulov Z.S., Rejabov S.A., Safarov O'.J Optimization of recovery rate of the solar-powered ion-exchange resin desalination technology / "Neft-gaz va oziq-ovqat sanoati texnologik jarayonlarini modellashtirish va optimal boshqarishning zamonaviy holati, istiqbollari" Respublika ilmiy-texnikaviy konferensiyasining tezislari to'plami, Toshkent, 2023, pp.7-8.

5. Eshbobayev J.A., Norqobilov A.T., Xamidov B.T., Farxadova S.I., Ungarov S.A., Sho'rlangan suv tarkibini analiz qilish hamda suv tarkibiga mos ion-almashinish smolasini tanlash / «Umidli kimyogarlar-2023» XXXII ilmiy-texnikaviy anjumanining maqolalar to'plami, Toshkent, 722-723 b.

6. Eshbobayev J.A., Norqobilov A.T., Xamidov B.T., Farxadova S.I. Oqova suvlarni tozalash jarayonini noqat'iy mantiq asosida boshqarish / «Umidli kimyogarlar-2024» XXXIII ilmiy-texnikaviy anjumanining maqolalar to'plami, Toshkent, 29-30 b.

7. Eshbobayev J.A., Farxadova S.I. Oqova suvlarni tozalash jarayonini intellektual boshqarish uchun noqat'iy mantiqiy qoidalar to'plamini ishlab chiqish / «Innovatsiya-2024» XXVIII Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiyasi, Toshkent, 133-135 b.

8. Eshbobayev J.A., Usmanov K.I., Boboyorov R.O. Oqova suvlarni tozalash jarayonini intellektual boshqarish uchun dasturiy ta'minot / EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risida guvohnoma. DGU 202310235, 15.12.2023 y.

9. Eshbobayev J.A. Oqova suvlarni ion-almashinish smolalari yordamida tozalash jarayonini avtomatik boshqarish uchun dasturiy ta'minot / EHM uchun yaratilgan dasturning rasmiy ro'yxatdan o'tkazilganligi to'g'risida guvohnoma. DGU 202310206, 20.12.2023 y.

Avtoreferat «Central Asian Food Engineering and Technology» ilmiy jurnali tahririyatida tahrirdan o‘tkazilib, o‘zbek, rus va ingliz tillaridagi matnlar o‘zaro muvofiqlashtirildi.

Bosmaxona litsenziyasi:



9338

Bichimi: 84x60 ¹/₁₆. «Times New Roman» garniturası.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog'i: 3,5. Adadi 100 dona. Buyurtma № 39/25.

Guvohnoma № 851684.
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Beruniy ko'chasi, 83-uy.