TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/2025.27.12.T.02.03 RAQAMLI ILMIY KENGASH

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

ISXAKOVA FATIMA FAXRITDINOVNA

KALSINATSIYALANGAN SODANI ISHLAB CHIQARISHDA KARBONIZATSIYALASH JARAYONINI TAKOMILLASHTIRILGAN BOSHQARUVI

05.01.08 – Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni avtomatlashtirish va boshqarish

texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi AVTOREFERATI

Toshkent – 2026

UO‘K 681.542.2

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati mundarijasi

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Content of dissertation abstract of Doctor Philosophy (PhD)

Isxakova Fatima Faxritdinovna
Kalsinatsiyalangan sodani ishlab chiqarishda karbonizatsiyalash jarayonini takomillashtirilgan boshqaruvi .....……..... 3

Исхакова Фатима Фахритдиновна
Усовершенствованное управление процессом карбонизации при производстве кальцинированной соды..... 21

Isxakova Fatima Faxritdinovna
Improved control of the carbonization process in soda ash production …….. 39

E’lon qilingan ishlar ro‘yxati
Список опубликованных работ
List of published works …….....42

**TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.03/2025.27.12.T.02.03 RAQAMLI ILMIY KENGASH**

TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI

ISXAKOVA FATIMA FAXRITDINOVNA

KALSINATSIYALANGAN SODANI ISHLAB CHIQARISHDA KARBONIZATSIYALASH JARAYONINI TAKOMILLASHTIRILGAN BOSHQARUVI

05.01.08 – Texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni avtomatlashtirish va boshqarish

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

Toshkent – 2026

Falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2026.3.PhD/T6988 raqam bilan ro‘yxatga olingan.

Dissertatsiya Toshkent davlat texnika universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o‘zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengashning veb-sahifasida (www.tdtu.uz) hamda “ZiyoNet” Axborot ta’lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:	**Yusupbekov Nodirbek Rustambekovich** texnika fanlari doktori, professor, O‘zR FA akademigi
Rasmiy opponentlar:	**Ivanyan Arsen Ignatyevich** texnika fanlari doktori (DSc)
	Xamidov Baxodir Tadjiddinovich texnika fanlari nomzodi, dotsent
Yetakchi tashkilot:	**“Uzkimyosanoatloyiha” AJ**

Dissertatsiya himoyasi Toshkent davlat texnika universiteti huzuridagi DSc.03/2025.27.12.T.02.03 raqamli Ilmiy kengashning 2026 yil «7» 12 soat 14⁰⁰ dagi majlisida bo‘lib o‘tadi. (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko‘chasi, 2. Tel.: (99871) 246-46-00; faks: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_@tdtu.uz).

Dissertatsiya bilan Toshkent davlat texnika universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (179 raqam bilan ro‘yxatga olingan). (Manzil: 100095, Toshkent shahri, Universitet ko‘chasi, 2. Tel.: (99871) 207-14-70).

Dissertatsiya avtoreferati 2026 yil «23» 11 kuni tarqatildi.
(2026 yil «2» 11 dagi 21 raqamli bayonomasi).

F.T.Adilov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash rais o‘rinbosari, t.f.d., professor

U.F.Mamirov
Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy kotibi, texnika fanlari doktori (DSc), 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) dissertatsiyasi annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati. So‘nggi yillarda jahonda murakkab kimyoviy-texnologik jarayonlarni avtomatlashtirilgan boshqarish tizimlariga, xususan matematik modellashtirish va bashoratli boshqarish usullaridan foydalanishga alohida e’tibor qaratilmoqda. Kalsinatsiyalangan soda ishlab chiqarishda karbonizatsiya jarayonini boshqarishda energiya va resurs tejamkorlikka erishish, shu bilan birgalikda mahsulot sifatining barqarorligini ta’minlovchi modellar, algoritmlar va tizimlarni ishlab chiqishga qaratilgan ishlanmalar istiqbolli hisoblanadi. Bu borada, karbonizatsiya jarayonining monand dinamik modelini yaratish va uning asosida jarayon texnologik parametrlarining o‘zgarishlarini hisobga oluvchi bashoratli boshqarish tizimlarini ishlab chiqish dolzarb masalalardan biri hisoblanadi.

Jahonda sanoat korxonalaridagi murakkab texnologik jarayonlarni matematik modellashtirish va zamonaviy texnologiyalar asosida boshqarish tizimlarini ishlab chiqishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Bu borada, jumladan, texnologik jarayonlarning holatlarini ularning parametrlarini o‘zgarishlarini real vaqt rejimida bashoratlash tizimlarini qurish imkonini beruvchi matematik modellar, usullar va algoritmlarni yaratish dolzarb hisoblanadi. Shu jihatdan, karbonizatsiya jarayoning termodinamik, kinetik va dinamik xususiyatlarini hisobga oluvchi matematik modellarni ishlab chiqish hamda ular asosida texnologik parametrlarning o‘zgarishlarini bashoratlash imkonini beruvchi takomillashgan boshqarish algoritmlarini ishlab chiqishga alohida e’tibor qaratilmoqda.

Respublikamizda hozirgi kunda texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni avtomatlashtirish hamda boshqarishning ilmiy-texnik yo‘nalishlarini rivojlantirishga, xususan, energiya va resurs tejamkorligini, barqarorligini va mahsulot sifatini ta’minlaydigan boshqarish tizimlarini takomillashtirishga alohida e’tibor qaratilmoqda. Murakkab kimyoviy-texnologik jarayonlari, shu jumladan kalsinatsiyalangan soda ishlab chiqarish jarayonlarini boshqarishning intellektual tizimlarini ishlab chiqish va joriy etish ustuvor yo‘nalishlardan biri hisoblanadi. 2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasida, xususan, “... iqtisodiyotning energiya va resurs sig‘imini qisqartirish, ishlab chiqarishga energiya tejovchi texnologiyalarni joriy etish, iqtisodiyot tarmoqlarida mehnat unumdorligini oshirish”[1] vazifalari belgilangan. Mazkur vazifalarni amalga oshirilishda, jumladan, kalsinatsiyalangan sodani ishlab chiqarishda karbonizatsiyalash jarayonini takomillashtirilgan boshqarish tizimlarini ishlab chiqish muhim masalalardan biridir.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024-yil 16-fevraldagi PF-36-son “Respublikada oziq-ovqat xavfsizligini ta’minlashning qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida”gi, 2018-yil 27-apreldagi PF-3682-son “Innovatsion g‘oyalar, texnologiyalar va loyihalarni amaliyotga joriy etish tizimini yanada

[1] O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 28-yanvardagi PF-60-son “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni

takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi, 2023-yil 12-oktyabrdagi PF-169-son “Sanoat va uning bazaviy tarmoqlarini jadal rivojlantirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Farmonlari hamda mazkur faoliyarga tegishli boshqa me’yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Dissertatsiya tadqiqoti respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining IV. “Axborotlashtirish va axborot-kommunikatsiya texnologiyalarini rivojlantirish” ustuvor yo‘nalishi doirasida bajarilgan.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Jahonning yetakchi ilmiy markazlari va oliy ta’lim muassasalarida murakkab kimyoviy-texnologik jarayonlarni, jumladan, moddalarning absorbsiyasi, kristallanishi va ajratilishi jarayonlarini yuqori samarali boshqarish tizimlarini rivojlantirishga qaratilgan ilmiy tadqiqotlar olib borilmoqda. Xususan, bu kabi tadqiqotlar “Honeywell”, “Siemens”, “Aspen Tech” kompaniyalarida, Massachusetts Institute of Technology (AQSh), Delft University of Technology (Niderlandiya), Tsinghua University (Xitoy), Osaka University va Tokyo Institute of Technology (Yaponiya) hamda boshqa ilmiy markazlarda faol olib borilmoqda. Mazkur ilmiy institutlarda tadqiqotlar murakkab ko‘p fazali jarayonlarni matematik modellashtirish usullarini ishlab chiqish, intellektual va bashoratli boshqarish tizimlarini yaratish, texnologik jarayonlarning energiya va resurs tejamkorligini, qurilmalarning barqarorligini va ishlash sifatini oshirishni ta’minlaydigan raqamli egizaklar hamda intellektual boshqarish tizimlari konsepsiyasini rivojlantirishga qaratilgan.

Murakkab texnologik jarayonlarni modellashtirish va boshqarish nazariyasi hamda amaliyotini rivojlantirishga xorijlik olimlar J.B.Rawlings [2], J.Qin [3], S.Skogestad[4], V.Cristea[5], X.Jin[6], P.Wylock[7], B. Haut[8], A.M.Cormos[9], A.Saberi[10], A.S.Goharrizi [11], Zhang [12], A.G.Afanasenko [13] va boshqalar salmoqli hissa qo‘shganlar.

---

[2] Rawlings J.B., Mayne D.Q. Model Predictive Control: Theory and Design. – Madison: Nob Hill, 2009. – 566 p.

[3] Qin S.J., Badgwell T.A. A survey of industrial model predictive control technology. // Control Engineering Practice. – 2003. – Vol. 11, No. 7. – P. 733–764.

[4] Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. – 2nd ed. – Chichester: Wiley, 2005. – 559 p.

[5] Cristea V.-M. Control Approaches of the Carbonation Column for Soda Manufacturing // Studia UBB Chemia. – 2017. – V. LXII, № 4, P. II. – C. 221–229. – DOI: 10.24193/subbchem.2017.4.19.

[6] Xiaoming Jin, Shuji Z., Wenlie L., Deying Z., Xinchun Z. On Applying Model Predictive Control for Carbonation Towers in Manufactory of Soda Ash // Information Technology Journal. – 2013. – T. 12, № 19. – C. 4911–4917. – DOI: 10.3923/itj.2013.4911.4917.

[7] Wylock C., Larcy A., Cartage T., Haut B., Compartmental modelling of an industrial bubble column / 8th world congress of chem eng (WCCE8), Chemical Engineering Unit, Université Libre de Bruxelles), (2009)

[8] Benoît Haut, Véronique Halloin, Thierry Cartage, Arnaud Cockx. Production of sodium bicarbonate in industrial bubble columns // Chemical Engineering Science. – 2004. – Vol. 59. –P. 5523–5535. – DOI: 10.1016/J.CES.2004.07.110.

[9] Ana-Maria Cormos, Paul Serban Agachi. Modeling and Simulation of Carbonation Process of Brine for Obtaining Sodium Carbonate // Revista de Chimie. – 2006. – Vol. 57. – No. 2. – P. 130–137.

[10] Saberi A., Goharrizi AS., Ghader S., Precipitation kinetics of sodium bicarbonate in an industrial bubble column crystallizer. Cryst Res Technol 44(2), (2009), 159–166.

[11] Goharrizi AS. , Abolpour B. Estimation of sodium bicarbonate crystal size distributions in a steady-state bubble column reactor. Res Chem Intermed 38(7), (2012), 1389–1401.

[12] Zhang H., Wang Y., Li C. Application of neural network-based predictive models in soda ash production //

Ularning tadqiqotlari dinamik modellarni qurish usullarini ishlab chiqish, prediktiv boshqaruv algoritmlarini sintez qilish, ko‘p bog‘lanishli tizimlarni tahlil qilish va murakkab kimyoviy-texnologik jarayonlarni, jumladan, karbonizatsiya va kristallanish jarayonlarini optimallashtirishga yo‘naltirilgan.

Mamlakatimizda N.R.Yusupbekov[14], X.Z.Igamberdiev[15], Sh.M.Gulyamov[16], D.P.Muxitdinov[17], I.X.Siddikov[18], M.A.Ismailov[19], Z.E.Iskandarov[20] kabi taniqli olimlarimiz texnologik jarayonlarni, shu jumladan, ko‘p komponentli jarayonlarni matematik modellashtirish, optimallashtirish va avtomatlashtirish usullarini rivojlantirishga katta hissa qo‘shganlar.

Bajarilgan tadqiqotlarning salmoqli hajmiga qaramay, so‘nggi yillarda texnologik jarayonlar, xususan, ammoniylashtirilgan tuzli eritmani karbonizatsiyalash jarayoni jiddiy o‘zgarishlarga uchradi. Bu energiya samaradorligini oshirish, xomashyo sarfini kamaytirish, ekologik talablarning kuchayishi va mahsulot sifatiga qo‘yiladigan talablarning ortishi bilan bog‘liq holda sezilarli darajada murakkablashdi. Bu esa an’anaviy lokal boshqarish tizimlaridan nochiziqli dinamikani, kanallararo bog‘lanishlarni va texnologik cheklovlarni hisobga olishga qodir bo‘lgan intellektual boshqarish tizimlariga o‘tishni taqozo etadi.

Shu bilan birga, adabiyotlarda karbonizatsiya jarayonini boshqarishning yagona konturida dinamik modellashtirish, prediktiv boshqaruv va raqamli texnologiyalarni birlashtiruvchi kompleks yondashuvlarni ishlab chiqishga yetarlicha e’tibor qaratilmagan. Boshqarish algoritmlari doirasida reaksiya kinetikasini, massa almashinish, kristallanish jarayonlarini va texnologik rejim cheklovlarini bir vaqtning o‘zida hisobga olish imkonini beradigan integratsiyalashgan yechimlar mavjud emas.

Shu munosabat bilan, karbonizatsiyalash jarayonini modellashtirish va prediktiv boshqarishning takomillashtirilgan usullarini ishlab chiqish kalsinatsiyalangan soda ishlab chiqarish texnologik jarayonlarining samaradorligi, barqarorligi va ishonchliligini oshirishga qaratilgan dolzarb ilmiy vazifa hisoblanadi.

Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 389. – Article 124332.

[13] Афанасенко А.Г., Веревкин А.П. Нейросетевое моделирование показателей качества процесса карбонизации. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, Уфа: УГАТУ, 2009, Т. 13, № 2 (35), с. 222–225.

[14] Юсупбеков Н.Р., Зокиров С.Г., Нурмухамедов Х.С. Кимёвий технология асосий жараён ва қурилмалари: назария, ҳисоб, лойиҳа. – Тошкент: «Sharq» нашриёт-матбаа акциядорлик компанияси, 2023. – 608 б.

[15] Х.З.Игамбердиев "Теория автоматического управления" “Zuxro baraka biznes” 2024. - 680 б.

[16] Sh.Gulyamov, Yu.Avazov, E.Samadov, N.Khojiyeva, Q.Bazarbaeva. Some issues of increasing energy efficiency of advanced process and production control systems // AIP Conference Proceedings.2025.

[17] D.Mukhitdinov, Yo.Kadirov, V. Shamsutdinova, G. Chulieva, D.Abdullaeva. Fuzzy MIMO model for efficient control of complex processes with uncertainties and nonlinearities // E3S Web of Conferences. – 2024.

[18] I.X. Siddikov, D.M. Umurzakova, O.V. Porubay, T.M. Abdullayev. Impact of Steady-State Error Minimization on the Performance of Numerical Optimization Techniques in Linear Automatic Control Systems // Journal of Robotics and Control (JRC). – 2025. – Vol. 6. – No. 6.

[19] M.Ismailov, F.Kasimov, Ru Jiang, Dong Zhang. Development of a Control Device and Algorithm for Autonomousmoving Systems // Chemical Technology, Control and Management. Vol. 2(92). – 2020. — pp. 62-69.

[20] Z. Iskandarov, T. Avezov, U. Khujanazarov. Fuzzy control system for yarn tension in the warping process // AIP Conference Proceedings. – 2025.

Dissertatsiya tadqiqotining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya tadqiqoti Toshkent davlat texnika universitetining quyidagi ilmiy-tadqiqot ishlari rejalarining OT-F7-88 – "Toza mahsulotlar olish uchun energiya va resurs tejamkor issiqlik-massa almashinish jarayonlarining istiqbolli murakkab kimyoviy-texnologik tizimlari nazariy asoslarini takomillashtirish" (2017-2020yy.) va FL-9524115110 – ""Sanoat 4.0" strategiyasi asosida murakkab texnologik jarayonlar va ishlab chiqarishlarni boshqarishda sun'iy intellekt va raqamlashtirishni qo'llashning ilmiy-nazariy asoslari" (2025-2029yy.) mavzulardagi loyihalari doirasida bajarilgan.

Tadqiqotning maqsadi termodinamik-kinetik va dinamik modellar asosida ammoniylashtirilgan tuzli eritmani karbonizatsiyalash jarayonini boshqarishning matematik ta'minotini ishlab chiqishdan iborat.

Tadqiqotning vazifalari:

ammoniylashgan tuzli eritmani karbonlashtirishni matematik tavsiflash va boshqarishning zamonaviy usullarini tahlil qilish, jarayonning samaradorligi va mahsulot sifatiga ta'sir etuvchi asosiy omillarni aniqlash, shuningdek mavjud avtomatik boshqarish tizimiga bo'lgan cheklanishlarni baholash;

tajriba va sanoat ma'lumotlari asosida reaksiyalar kinetikasi, issiqlik va massa almashinish, gaz-suyuqlik tizimining gidrodinamikasi hamda natriy gidrokarbonatning kristallanish qonuniyatlarini hisobga oluvchi karbonizatsiya jarayonining dinamik matematik modelini ishlab chiqish va tasdiqlash;

karbonizatsiya jarayonining LPV-ko'rinishini ishlab chiqish va uning asosida texnologik cheklovlar hamda noaniqliklarni inobatga olgan holda asosiy texnologik parametrlarni muvofiqlashtirilgan tarzda rostlashni ta'minlaydigan ko'p o'lchamli modelga asoslangan bashoratli boshqarish (MPC) tizimini sintezlash;

jarayonning o'lchash qiyin bo'lgan parametrlarini baholash uchun virtual analizator ishlab chiqish va uni karbonizatsiya kolonnasining avtomatlashtirilgan boshqarish tizimi tarkibiga integratsiyalash imkoniyatini tadqiq etish;

ishlab chiqilgan MPC-tizimi va an'anaviy rostlash usullarini imitatsion modellashtirish hamda qiyosiy tahlil qilish, shuningdek, uni sanoatga joriy qilishning texnik-iqtisodiy samaradorligini baholash.

Tadqiqotning obyekti kalsinatsiyalangan soda ishlab chiqarishda ammoniylashtirilgan tuzli eritmani karbonizatsiyalash jarayonini boshqarish tizimi olingan.

Tadqiqotning predmeti karbonizatsiya kolonnasi rejimlarini matematik modellashtirish, identifikatsiyalash, bashoratli boshqarish va optimallashtirish usullari modellari va algoritmlaridan iborat.

Tadqiqot usullari. Tadqiqot jarayonida tizimli tahlil, matematik modellashtirish, intellektual va noaniq boshqarish, shuningdek, murakkab dinamik obyektlarni optimallashtirish va bashoratlash usullaridan foydalanilgan.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

kimyoviy reaksiyalar kinetikasi, issiqlik va massa almashinish jarayonlari, gaz-suyuqlik tizimining gidrodinamik xususiyatlari hamda natriy bikarbonatning

kristallanish qonuniyatlarini hisobga olgan holda karbonizatsiya jarayonining dinamik matematik modeli ishlab chiqilgan;

holatlar fazosi matritsalarini joriy texnologik o‘zgaruvchilar orqali parametrlashtirish asosida karbonizatsiya kolonnasi nochiziqli modelini obyekt uchun boshqaruvni sintezlashda chiziqli usullardan foydalanish imkonini beradigan parametrlari o‘zgaruvchan model ko‘rinishda taqdim etish yondashuvi taklif etilgan;

boshqarish ta’sirlari va nazorat qilinadigan o‘zgaruvchilarga qo‘yilgan cheklovlarni hisobga olgan holda, o‘zaro bog‘liq texnologik parametrlarni muvofiqlashtirilgan tarzda boshqarishni ta’minlaydigan karbonizatsiya jarayonini model-bashoratli boshqarishning ko‘p o‘lchovli tizimi tuzilmasi ishlab chiqilgan;

fizik-kimyoviy jarayonlarning matematik modeliga asoslangan va real vaqt rejimida o‘lchash qiyin bo‘lgan karbonizatsiya jarayonining sifat parametrlarini baholash uchun mo‘ljallangan virtual analizator taklif etilgan.

Tadqiqotning amaliy natijalari quyidagilardan iborat:

kalsinatsiyalangan soda ishlab chiqarishda karbonizatsiyalash kolonnalarining ish rejimlarini tahlil qilish, optimallashtirish va bashoratlash uchun qo‘llanilishi mumkin bo‘lgan matematik model va dasturiy majmua ishlab chiqilgan;

o‘zaro bog‘liq texnologik parametrlarni muvofiqlashtirilgan holda boshqarish va texnologik cheklovlarni hisobga olish orqali ko‘p bog‘lanishli karbonizatsiyalash jarayonini boshqarish sifatini oshirishni ta’minlaydigan MPC tizimi taklif etilgan;

jarayonning o‘lchash qiyin bo‘lgan ko‘rsatkichlarini tezkor nazorat qilish va qurilmaning ishlash rejimini real vaqt rejimida sozlash imkonini beradigan virtual analizator ishlab chiqilgan;

ish natijalarini talab qilingan sifatdagi natriy bikarbonat unumini oshirishga, CO_2 va energiya resurslari sarfini kamaytirishga, shuningdek, texnologik rejim barqarorligini oshirishga yordam beradi amaldagi TJABTga joriy etish uchun strukturaviy imitatsion modeli taklif etilgan.

Tadqiqot natijalarning ishonchliligi. Tadqiqot natijalarning ishonchliligi dinamik tizimlarni matematik modellashtirish va boshqarishning zamonaviy usullaridan foydalanilganligi, qo‘llanilgan matematik apparatning to‘g‘riligi va ishlab chiqilgan prediktiv boshqarish algoritmlarining ishchanligi, shuningdek, tahliliy tadqiqotlar, kompyuterda modellashtirish va hisoblash tajribalari natijalarining o‘zaro muvofiqligi bilan tasdiqlanadi.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati murakkab nochiziqli ko‘p bog‘lanishli kimyoviy-texnologik obyektlarni boshqarishning nazariy va uslubiy asoslarini rivojlantirish, ko‘p fazali jarayonlarni modelli-prediktiv boshqarish usullarini takomillashtirish va ammoniylashtirilgan tuzli eritmani karbonizatsiyalash jarayonlarini raqamli boshqarish bo‘yicha ilmiy tasavvurlarni kengaytirish bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati texnologik rejimning sifati va barqarorligini oshirish, maqsadli mahsulot chiqimini ko‘paytirish, solishtirma energiya va reagentlar sarfini kamaytirish, shuningdek, kalsinatsiyalangan soda

ishlab chiqarishning amaldagi avtomatlashtirilgan boshqarish tizimlarini modernizatsiya qilish imkonini beruvchi karbonizatsiya jarayonining matematik modeli, virtual analizator hamda modelga asoslangan bashoratli boshqarish algoritmlarining ishlab chiqilganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarini joriy qilinishi. Karbonizatsiya jarayonini boshqarishni takomillashtirish bo‘yicha ilmiy natijalar asosida:

karbonnizatsiya jarayonining dinamik matematik modelining dasturiy ta’minoti “Qo‘ng‘irot soda zavodi” MChJga joriy qilingan (“O‘zkimyosanoat” AJ ning 2026-yil 21-avgustdagi 14-2199-son ma’lumotnomasi). Natijada texnologik parametrlarni 4,7% maksimal nisbiy xatolik bilan bashoratlash imkonini bergan;

ko‘p o‘lchamli modelga asoslangan bashoratli boshqarish tizimi “Qo‘ng‘irot soda zavodi” MChJga joriy qilingan (“O‘zkimyosanoat” AJ ning 2026-yil 21-avgustdagi 14-2199-son ma’lumotnomasi). Natijada rostlash aniqligi ikki barobar oshib, o‘tish jarayonining davomiyligi deyarli ikki barobariga qisqarishiga erishilgan;

virtual analizator “Qo‘ng‘irot soda zavodi” MChJga joriy qilingan (“O‘zkimyosanoat” AJ ning 2026-yil 21-avgustdagi 14-2199-son ma’lumotnomasi). Natijada real vaqt rejimida o‘lchanishi qiyin bo‘lgan parametrlarning tezkor baholanishiga erishilgan.

Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 2 ta xalqaro va 2 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida taqdim etilgan va muhokama qilingan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinishi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha 11 ta ilmiy ish, shu jumladan O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasi tomonidan tavsiya etilgan nashrlarda 5 ta maqola chop etilgan bo‘lib, shundan 1 tasi xorijiy ilmiy jurnalda nashr etilgan hamda 2 ta EHM uchun yaratilgan dasturiy vositalarga O‘zbekiston Respublikasi Intellektual mulk agentligidan ro‘yxatdan o‘tkazish guvohnomalari olingan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya kirish, to‘rtta bob, xulosa, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovani o‘z ichiga oladi. Ishning umumiy hajmi 116 sahifa matndan iborat.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Kirish qismida o‘tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obyekt va predmetlari tavsiflangan, respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi ko‘rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo‘yicha ma’lumotlar keltirilgan.

Birinchi bobda ammoniylashtirilgan namakobni karbonizatsiyalash jarayonini boshqarishning zamonaviy yondashuvlari tahlil qilingan. Mavjud boshqarish tizimlari asosan mahalliy tartibga solishga asoslanganligi va texnologik parametrlarning o‘zaro bog‘liqligini yetarli darajada hisobga olmasligi aniqlandi.

Model-prediktiv boshqarish tizimini sintez qilish uchun jarayonning dinamik modelini ishlab chiqish zarurati asoslandi.

Ikkinchi bobda ammoniylashtirilgan tuzli eritmani karbonizatsiyalash jarayonining matematik modeli ishlab chiqilgan va tadqiq qilingan.

Aniqlanishicha, karbonizatsiya jarayoni ammiak-soda ishlab chiqarishning asosiy bosqichi bo‘lib, natriy bikarbonat kristallarining chiqishi, sifati va morfologik xususiyatlarini belgilaydi. Jarayonning kimyoviy mexanizmi CO_2 ning yutilishi, oraliq birikmalarning hosil bo‘lishi, gidroliz va $NaHCO_3$ ning keyingi kristallanish bosqichlarini o‘z ichiga olishini ko‘rsatib o‘tilgan. Jarayonning dastlabki bosqichlarida uglerod dioksidining kimyoviy absorbsiyasi cheklovchi hisoblanadi, karbonizatsiya darajasi ortishi bilan esa hajmiy reaksiyalar va diffuziya jarayonlarining ta’siri ortadi.

Dinamikaning dastlabki miqdoriy tavsifi uchun maqsadli mahsulotning hosil bo‘lish tezligi va boshlang‘ich moddalar konsentratsiyasining o‘zgarishi o‘rtasidagi o‘zaro bog‘liqlikni aniqlash imkonini beradigan umumiy reaksiya modelidan foydalanish maqsadga muvofiq.

Qabul qilingan farazlar asosida komponentlarning shartli belgilari (*$NaCl$ – A; NH_4OH – B, CO_2 – C; $NaHCO$ – E; NH_4Cl – F)* kiritiladi, so‘ngra reaksiyalar tizimi ixcham shaklda (1) – (2) taqdim etiladi.

$$NaCl + NH_4OH + CO_2 = NaHCO_3 + NH_4Cl, \tag{1}$$

$$A + B + C \rightarrow E(k_1) + F(k_2). \tag{2}$$

Jarayon dinamikasi ta’sir etuvchi massalar qonuni asosida tavsiflanadi hamda reaksiyaning umumiy tezligiga to‘g‘ri va teskari aylanishlarning hissasini inobatga oluvchi (3)-(4) ifodalar bilan rasmiylashtiriladi:

$$D(t,c) = \begin{cases} \dfrac{\partial C_A}{\partial t} = -(k_1 + k_2) \cdot C_A \cdot C_B \cdot C_c, \\ \dfrac{\partial C_B}{\partial t} = -(k_1 + k_2) \cdot C_A \cdot C_B \cdot C_c, \\ \dfrac{\partial C_C}{\partial t} = -(k_1 + k_2) \cdot C_A \cdot C_B \cdot C_c, \\ \dfrac{\partial C_E}{\partial t} = k_1 \cdot C_A \cdot C_B \cdot C_c, \\ \dfrac{\partial C_F}{\partial t} = k_2 \cdot C_A \cdot C_B \cdot C_c. \end{cases} \tag{3}$$

bu yerda: C_A, C_B va C_C – tegishli moddalarning mol/l da o‘lchanadigan konsentratsiyalari; k_1 va k_2 – kimyoviy reaksiya tezligi konstantalari.

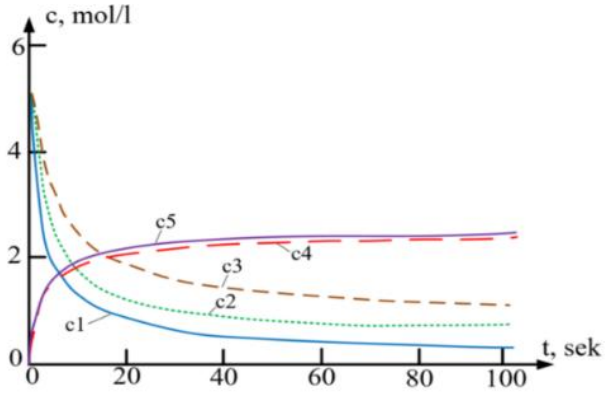
$$D(t,c)=\begin{bmatrix} -(k_1+k_2)\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3 \\ -(k_1+k_2)\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3 \\ -(k_1+k_2)\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3 \\ k_1\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3 \\ k_2\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Hisoblash tajribasida dastlabki konsentratsiyalar va tezlik konstantalari qiymatlari qo‘llanildi:

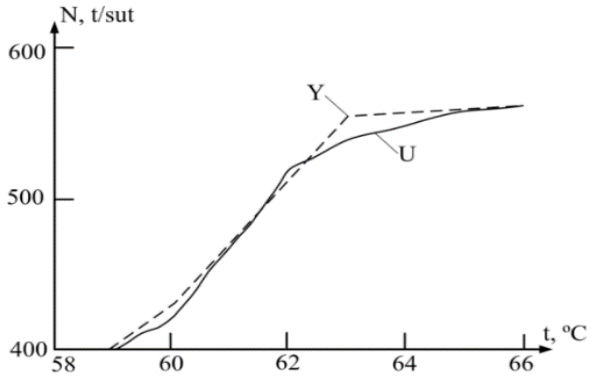
C_1=1; C_2=1.1; C_3=1.2; C_4= 0; C_5=0; k_1=1; k_2=k_1+0,02.

Tizimning sonli yechimi Mathcad dasturida to‘rtinchi tartibli Runge-Kutta usuli yordamida amalga oshirildi. Modellashtirish natijalari (1-rasm) natriy gidrokarbonatning hosil bo‘lishi va ammoniy xloridning vaqt o‘tishi bilan to‘planish qonuniyatlarini o‘rganish imkonini berdi.

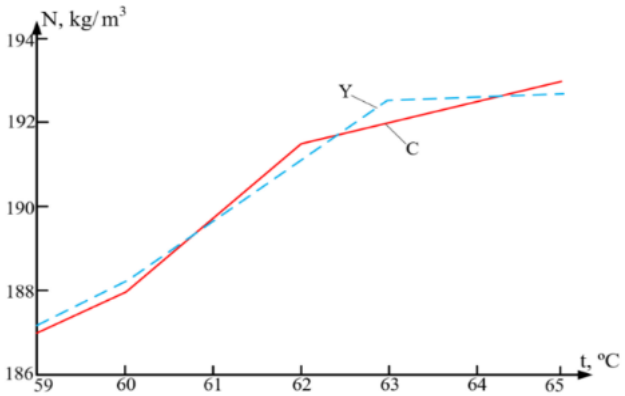
Tajribaviy ma’lumotlar asosida asosiy texnologik bog‘lanishlar aniqlandi hamda kolonnananing $NaHCO_3$ bo‘yicha unumdorligini jarayon haroratiga (2-rasm), bog‘langan NH_4Cl miqdorini kristallanish zonasi haroratiga (3-rasm), shuningdek, absorbsiya va sovutish zonalarining o‘lchamlarini karbonat angidrid sarfiga bog‘liqligini ifodalovchi approksimatsiyaviy bog‘lanishlar olindi (4-rasm).



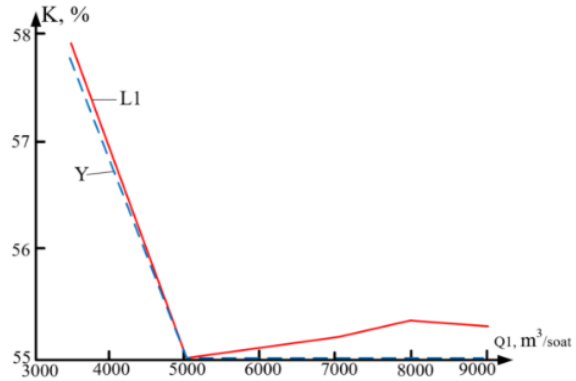
1-rasm. Karbonizatsiya kimyoviy reaksiya kinetikasining grafiki.



2-rasm. $NaHCO_3$ hosil bo‘lishiga haroratning ta’siri.



3-rasm. Suspenziyadagi NH_4Cl konsentratsiyasiga haroratning ta’siri.



4-rasm. Sovutish zonasi kattaligining CO_2 sarfiga bog‘liqligi.

Modellashtirish xatosi qo‘llanma bo‘yicha aniqlandi: SOR=$\Sigma(Y\text{-}L_1)^2$ va 0.265 ni tashkil etdi, bu ruxsat etilgan.

Harorat natriy gidrokarbonat unumiga ham, suspenziyadagi bog‘langan ammoniy xlorid NH_4Cl miqdoriga ham ta’sir qiluvchi omillardan biri ekanligi aniqlandi.

Shunga qaramay, empirik bog‘liqliklar jarayonning ichki tuzilishini aks ettirmaydi, bu esa umumiyroq dinamik qo‘yilishga o‘tishni talab qiladi.

Jarayonni dinamikada tavsiflash uchun holatlar fazosida nochiziqli matematik model ishlab chiqilgan. Modelni qurishda kimyoviy kinetika, moddiy va issiqlik balans tenglamalari, shuningdek, massa almashinish va diffuziya munosabatlaridan foydalanildi. Modelning asosiga ta’sir etuvchi massalar qonuni va kimyoviy reaksiyalar tezligiga haroratning ta’sirini hisobga olish imkonini beruvchi Arrenius tenglamasi olingan.

Ta’sir etuvchi massalar qonuni reaksiyaning tezligi ishtirok etuvchi moddalar konsentratsiyalarining ko‘paytmasiga bevosita bog‘liqligini, har bir konsentratsiya reaksiyani tavsiflovchi tenglamadagi uning stexiometrik koeffitsiyentiga mos keladigan darajaga ko‘tarilishini tasdiqlaydi.

$$r_j = k_j(T)\prod_{i=1}^{n} C_i^{v_{ij}},$$

bu yerda: $k_j(T)$ – tezlik doimiysi, v_{ij} – stexiometrik koeffitsiyentlar.

Karbonizatsiya jarayonida moddalar konsentratsiyasining o‘zgarishini tavsiflash uchun umumlashtirilgan differensial tenglamani quyidagi ko‘rinishda yozish mumkin:

$$\frac{d[C_i]}{dt} = R_i(C_1, C_2, ..., C_n, T, P) + D_i + F_i,$$

bu yerda: C_i – reaksiyada ishtirok etayotgan barcha moddalarning konsentratsiyasi (mol/l); t – vaqt (s); R_i – i-komponentning hosil bo‘lish yoki sarflanish tezligini tavsiflovchi funksiya; T – tizim harorati (K); P – bosim (Pa); D_i – diffuziya; F_i – konvektiv ko‘chish.

Vektor-matritsa shaklida bu tenglamani quyidagi ko‘rinishda ifodalash mumkin:

$$\frac{dC}{dt} = S_r(C, T) + D + F,$$

bu yerda: S – stexiometrik matritsa.

Keyinchalik kimyoviy o‘zgarishlarning stexiometrik matritsasi ishlab chiqilgan bo‘lib, u reaksiya tizim komponentlari o‘rtasidagi o‘zaro aloqalarning rasmiylashtirilgan tavsifini ta’minlaydi. Uning asosida moddaning konvektiv va diffuziya almashinishi hisobga olgan holda, komponentlar konsentratsiyasining fazo va vaqt bo‘yicha o‘zgarishini ifodalovchi nochiziqli differensial tenglamalar tizimi hosil qilindi.

Aniqroq tasavvur qilish uchun bu tenglamani quyidagi ko‘rinishda qayta yozish mumkin:

$$\frac{dCx_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n} v_{ij}\omega_j,\ i = \overline{1,m}.$$

Jarayonning issiqlik balansi quyidagi nisbat bilan tavsiflanadi:

$$pc_r \frac{dT}{dt} = Q_{reak.} + Q_{issiqlikalmash.}.$$

Fazoviy bir jinsli bo‘lmaganlikni hisobga olib, konsentratsiyalar dinamikasini quyidagicha yozish mumkin:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = R_i + D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - v\frac{\partial C_i}{\partial z}.$$

Taqdim etilgan ma’lumotlar asosida qurilgan kinetik model karbonizatsiya jarayonini tushunish, optimallashtirish va boshqarish, shuningdek, yangi texnologiyalar va materiallarni ishlab chiqish uchun qimmatli vosita bo‘lishi mumkin. U jarayon haqida chuqur tasavvurga ega bo‘lish, uning xatti-harakatlarini bashorat qilish, ish rejimlarini optimallashtirish, boshqarish algoritmlarini (MPC/NMPC) sintez qilish, shuningdek, yanada samarali yechimlarni yaratish imkonini beradi.

Ishlab chiqilgan model validatsiyasi o‘tkazildi. Modellashtirish natijalarini eksperimental ma’lumotlar bilan taqqoslash jarayon tavsifining qoniqarli aniqligini ko‘rsatdi. Maksimal nisbiy xatolik 4,7% dan oshmaydi, bu esa modelning adekvatligini va undan karbonizatsiya rejimlarini bashorat qilish hamda optimallashtirish uchun foydalanish mumkinligini tasdiqlaydi.

Olingan model optimal boshqarish masalalarini yechish uchun zarur bo‘lgan xususiyatlarga ega: jarayonning dinamik xususiyatini, texnologik o‘zgaruvchilarning ko‘p bog‘lanishini hisobga oladi, texnologik cheklovlarni kiritishga ruxsat beradi va obyektning yakuniy vaqt gorizontida holatini bashorat qilishni ta’minlaydi.

Uchinchi bobda ammoniylashtirilgan tuzli eritmani karbonizatsiyalash jarayonini modelli-prediktiv boshqarish tizimi ishlab chiqilgan.

Karbonizatsiya kolonnasi yaqqol ifodalangan nochiziqlilik, ko‘p bog‘lanishlilik, texnologik cheklovlarning mavjudligi hamda turli foydalanish rejimlari o‘rtasida o‘tishdagi dinamik xususiyatlarning o‘zgarishi bilan tavsiflanishi ko‘rsatib o‘tilgan. Shu sababli tartibga solishning an’anaviy usullari boshqarishning talab qilingan sifatini ta’minlamaydi.

Modelni bashoratli boshqarish (MPC) tizimini sintez qilish masalasi boshqaruvchi va rostlanuvchi o‘zgaruvchilarga bo‘lgan cheklovlarni hisobga olgan holda ko‘p o‘lchovli optimal boshqarish masalasi sifatida shakllantirilgan. Jarayonning boshqaruvchi ta’sirlari, nazorat qilinadigan parametrlari va asosiy g‘alayonlantiruvchi omillari aniqlandi. Obyektning bashoratlovchi modeli, optimallashtirish bloki, teskari aloqa konturi va sirpanuvchi gorizont mexanizmini o‘z ichiga olgan MPC-rostlagichning strukturasi ishlab chiqilgan. Taklif etilgan tizim obyektning kelajakdagi xatti-harakatlarini bashorat qilish va boshqarishning

har bir qadamida optimallashtirish masalasini hal qilish asosida boshqarish ta’sirlarini shakllantirishni ta’minlaydi.

Tizim sintezi masalasining qo‘yilishini quyidagicha ifodalash mumkin:

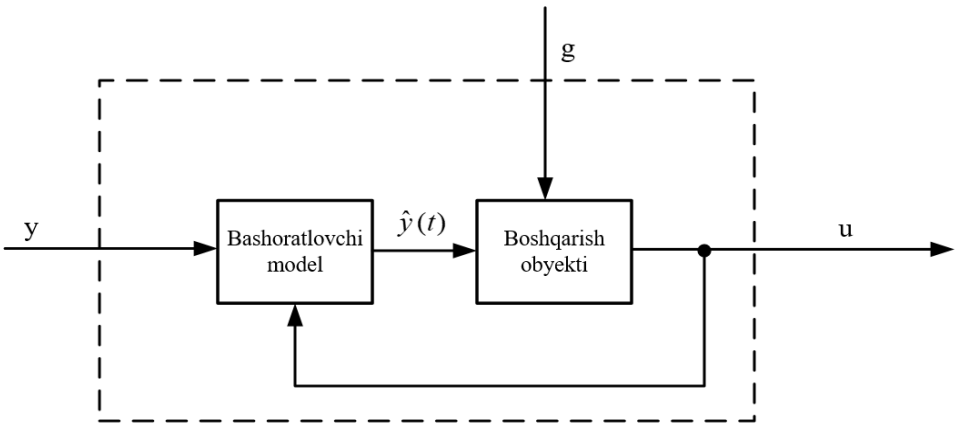
$$x_{k+1} = A(p_k)x_k + B(p_k)u_k,$$
$$y_k = C(p_k)x_k$$

va optimallashtirish funksiyasini:

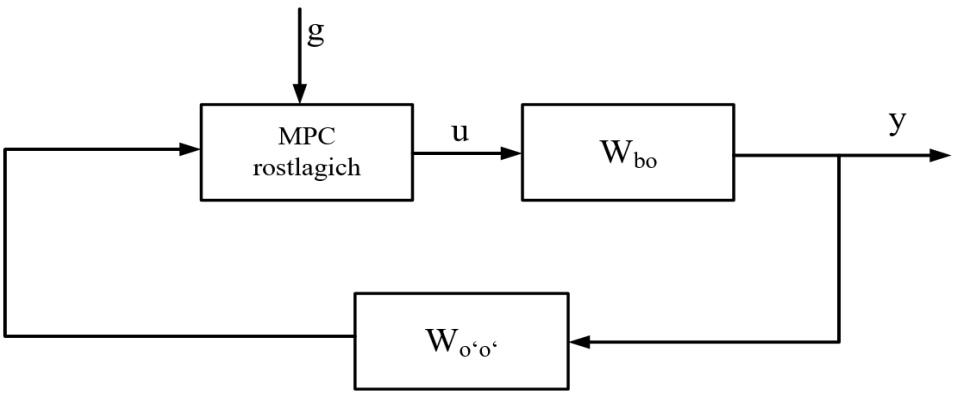
$$J = \sum_{i=1}^{N_P} (y_{k+i} - y_{ref})^T Q(y_{k+i} - y_{ref}) + \sum_{i=0}^{N_{c-1}} \Delta u_{k+i}^T R \Delta u_{k+i}.$$

Prediktorni shakllantirish uchun boshqaruvchi ta’sirlar, tashqi g‘alayonlar va nazorat qilinadigan chiqish o‘zgaruvchilarini hisobga oluvchi holatlar fazosining diskret modelidan foydalanilgan. Bashoratlash va boshqarish gorizontlarini, shuningdek, sifat funksionalining vazn koeffitsiyentlarini tanlashni asoslash amalga oshirildi.

5-rasmda modelli-prediktiv tartibga solish tamoyili bo‘yicha ishlaydigan boshqarish tizimining tarkibiy sxemasi keltirilgan bo‘lib, unda boshqarish ta’siri obyekt dinamikasini bashorat qilish va yakuniy gorizontda optimallashtirish masalasini yechish asosida shakllantiriladi.



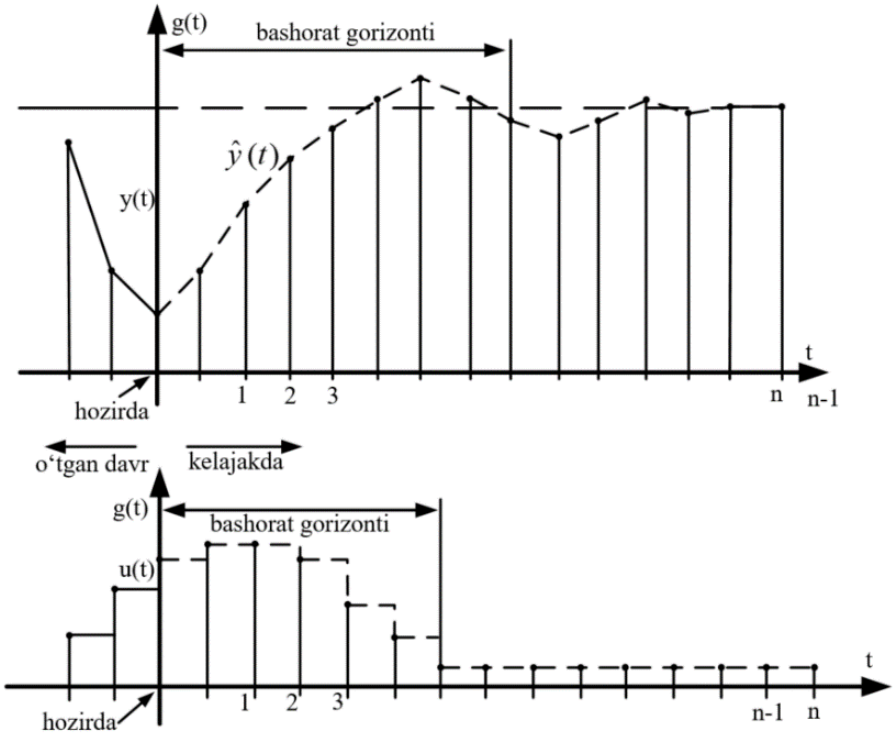
5-rasm. MPC asosidagi rostlagichni qo‘llagan holda obyektni avtomatik boshqarishni tashkil etish sxemasi.



6-rasm. Obyektning bashoratlovchi modeli va optimallashtirish blokini o‘z ichiga olgan MPC-rostlagichli boshqarish tizimining tarkibiy sxemasi.

6-rasmda MPC-rostlagich asosiy rol o‘ynaydigan boshqaruv tizimining yanada batafsil tuzilmasi tasvirlangan. Uning tarkibiga boshqariladigan obyektning bashorat modeli va optimallashtirish bloki kiradi. Ushbu tuzilmada bashorat qiluvchi model chiqish o‘zgaruvchilarining kelajakdagi trayektoriyalarini hisoblash uchun ishlatiladi, optimallashtirish bloki esa tizimning kirish va chiqish parametrlariga qo‘yilgan sifat mezonlari va cheklovlarni hisobga olgan holda optimal boshqaruv ta’sirini tanlashni ta’minlaydi.

MIMO modelining bashorat qilish xususiyatlaridan foydalanish berilgan bashorat gorizontida obyekt holatining evolyutsiyasini baholash imkonini beradi, bu esa boshqarish tizimining funksional imkoniyatlarini sezilarli darajada kengaytiradi va uning samaradorligini oshiradi. Obyektning nazorat qilinuvchi parametrlari qiymatlarini bir nechta ogohlantirish qadamlarida bashorat qilish namunasi 7-rasmda keltirilgan.



7-rasm. Obyektning nazorat qilinuvchi parametrlari qiymatlarini ogohlantirishning bir necha qadamlarida bashorat qilish.

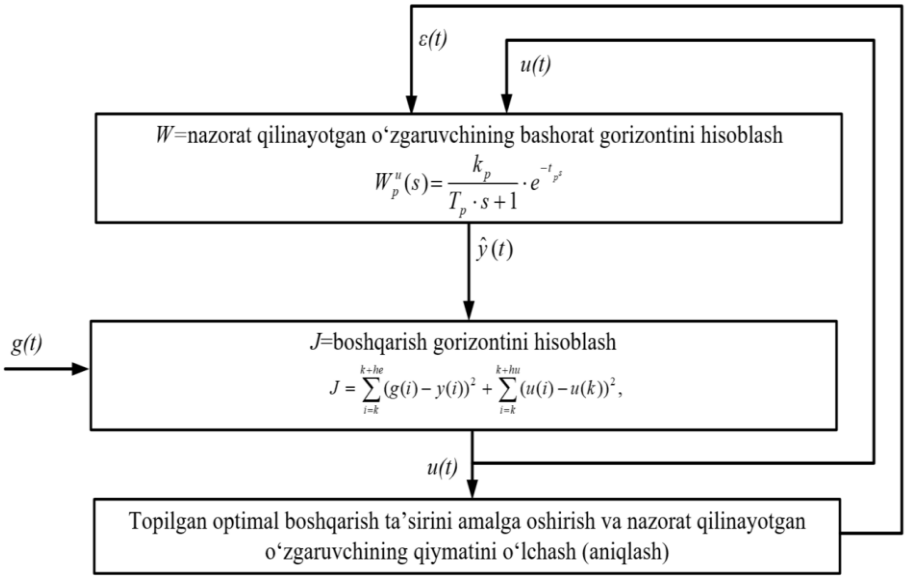
Hisoblangan boshqaruvchi ta’sir *u(t)* boshqarish obyektiga uzatiladi va texnologik konturda amalga oshiriladi. Keyingi bosqichda, jarayon holatining yangilangan o‘lchovlari kelib tushgandan so‘ng, takroriy optimallashtirish jarayoni bajariladi, natijada boshqarish o‘zgaruvchisining yangi qiymati shakllanadi.

Shunday qilib, boshqarish obyektning holati haqidagi dolzarb ma’lumotlarni hisobga olgan holda boshqaruvchi ta’sirlarni tuzatishni ta’minlaydigan rekurrent qayta hisoblash tamoyili bo‘yicha amalga oshiriladi.

MPC-rostlagichning ishlash prinsipining grafik tasviri 8-rasmda keltirilgan.

Obyektning nochiziqligini hisobga olishga alohida e’tibor qaratilgan. Bu maqsadda LPV-ko‘rsatishdan (Linear Parameter Varying) foydalanish taklif etilgan bo‘lib, unda model parametrlari kolonnaning joriy ishlash rejimiga qarab

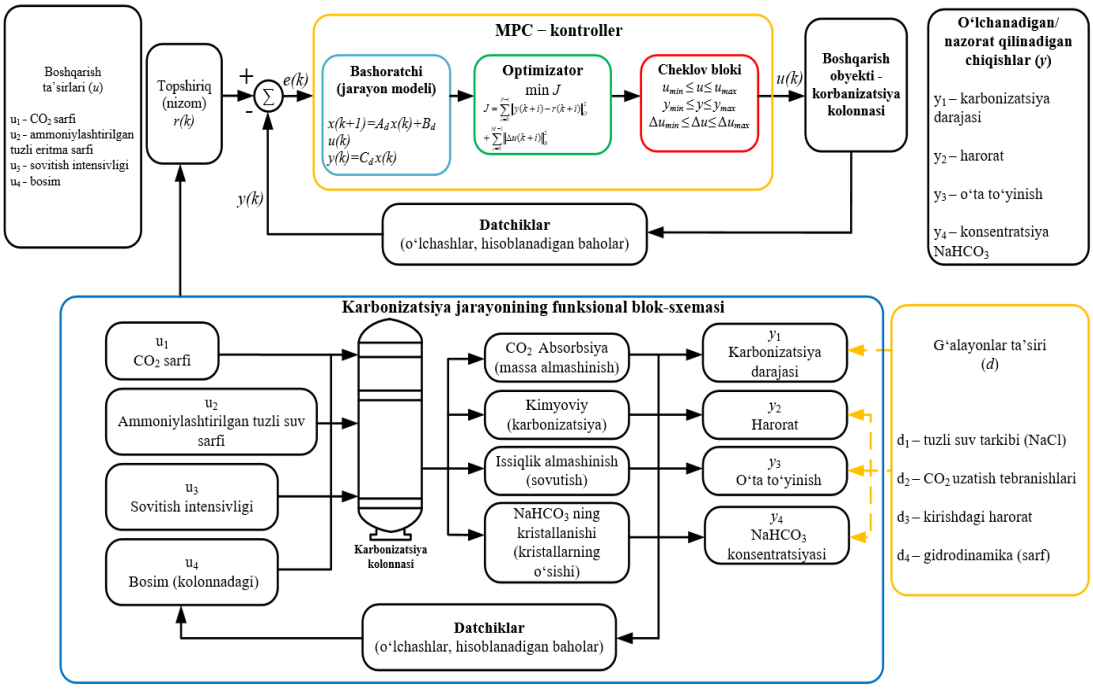
o‘zgaradi. Bunday yondashuv nochiziqli bashoratli boshqarishning murakkab hisoblash algoritmlariga o‘tmasdan, harorat, karbonizatsiya darajasi, ammiak konsentratsiyasi va uglerod dioksidi sarfining o‘zgarishini hisobga olish imkonini beradi.



8-rasm. MPC-rostlagichning ishlash prinsipi tasviri.

To‘rtinchi bobda ishlab chiqilgan boshqarish tizimining samaradorligini imitatsion modellashtirish va tadqiq qilish amalga oshirilgan.

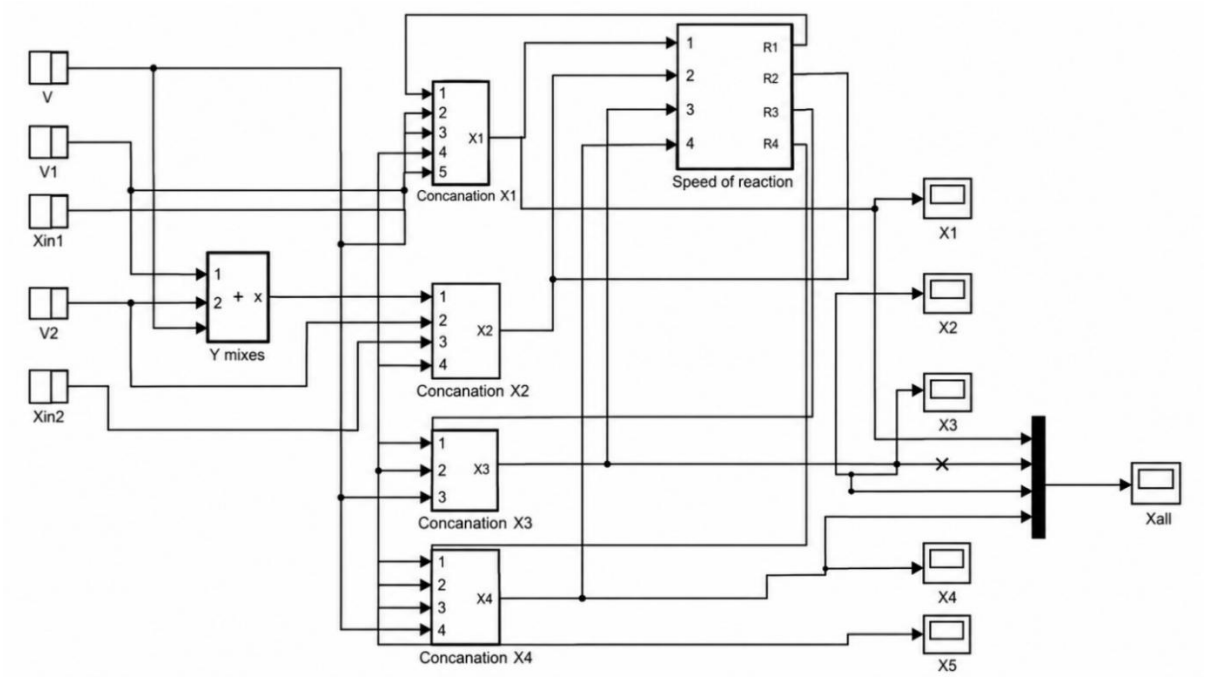
Hisoblash tajribalarini o‘tkazish uchun karbonizatsiya jarayonining dinamik modeli, MPC algoritmi, g‘alayonlarni shakllantirish bloklari va sonli tahlil vositalarini o‘z ichiga olgan MATLAB/Simulinkda integrallashgan modellashtirish muhiti ishlab chiqildi.



9-rasm. MPC-rostlagichi karbonizatsiya jarayonini boshqarish tizimining strukturaviy imitatsion modeli.

Tuzilmaviy imitatsion model ko‘p kirish-ko‘p chiqish (MIMO) tizimi sifatida qurilgan bo‘lib, u karbonizatsiya jarayonining fizik-kimyoviy tabiatini taqsimlangan parametrlar va yaqqol ifodalangan o‘zaro bog‘liqliklarga ega obyekt sifatida aks ettiradi (9-rasm).

Matlab dasturida boshqarish tizimining imitatsion modeli 10-rasmda keltirilgan. Shakllangan modellashtirish muhiti yopiq boshqarish konturida ham alohida kanallarning dinamikasini, ham ko‘p bog‘lamli tizimning umumiy xatti-harakatini tadqiq qilish imkonini beradi.



10-rasm. Boshqarish tizimining imitatsion modeli.

Boshqaruv tizimi tegishli sath, harorat va sarf datchiklari bilan jihozlangan sathni (LIRC), haroratni (TIRC) hamda gaz aralashmalari sarflarini (FIRC) rostlash konturlari, shuningdek, CO_2 konsentratsiyasini nazorat qilish uchun mo‘ljallangan gaz analizatorlari ATni o‘z ichiga oladi. Bundan tashqari, tizim tarkibiga karbonizatsiya jarayonining matematik modelini amalga oshiradigan hamda o‘lchash qiyin bo‘lgan texnologik parametrlarni va mahsulotning sifat ko‘rsatkichlarini real vaqt rejimida aniqlashga mo‘ljallangan, mikroprotsessorli hisoblash qurilmasi ko‘rinishidagi virtual analizator kiritilgan.

Boshqarish samaradorligini baholash uchun tuzli eritma tarkibining o‘zgarishi, CO_2 sarfining o‘zgarishi, harorat ta’siri va rejimning buzilishini o‘z ichiga olgan g‘alayonlarning namunaviy ssenariylari to‘plami shakllantirildi.

MPC-rostlagichni sozlash parametrlarining boshqarish sifatiga ta’siri tadqiq etildi. Nazorat qilinuvchi o‘zgaruvchilar vaznining ortishi belgilangan rejimga tezroq erishishni ta’minlashi, biroq boshqaruvchi ta’sirlar intensivligining ortishi bilan kechishi ko‘rsatilgan. Tartibga solish sifati va hisoblash xarajatlari o‘rtasidagi murosani ta’minlovchi bashoratlash va boshqarish gorizontlarining ratsional qiymatlari aniqlandi.

Ishlab chiqilgan MPC tizimi noaniq PID-rostlagichga asoslangan an’anaviy

boshqarish tizimi bilan taqqoslandi. Modellashtirish natijalari shuni ko‘rsatdiki, MPC dan foydalanish rejimga chiqish vaqtini 180 soniyadan 90 soniyagacha qisqartirish, qayta rostlashni 22 % dan 8 % gacha kamaytirish, mahsulot sifatining o‘zgaruvchanligini 40 % ga kamaytirish va energiya sarfini taxminan 10 % ga kamaytirish imkonini beradi.

Taqqoslash natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval.

Ishlab chiqilgan MPC tizimini noaniq PID-rostlagich asosidagi an’anaviy boshqarish tizimi bilan taqqoslash natijalari

Ko‘rsatkichlar	**Noaniq PID rostlagichi**	**MPC rostlagichi**
O‘tish jarayonini o‘rnatish vaqti	180 s	90 s
Qayta rostlash	22 %	8 %
Energiya sarfi	100 %	90 %

Jadvaldan ko‘rinib turibdiki, prediktiv boshqarishni qo‘llash tashqi g‘alayonlarning yanada samarali kompensatsiyasini ta’minlaydi, texnologik rejimning barqarorligini yaxshilaydi va xavfsizlik talablarini buzmasdan texnologik cheklovlar yaqinida uskunalarni ishlatish imkonini beradi.

XULOSA

Dissertatsiyada murakkab kimyoviy-texnologik jarayonlarni modellashtirish hamda intellektual va bashoratli boshqarish nazariyasining konsepsiyalari asosida karbonizatsiyalash jarayonini MIMO-modelga ega bashoratli MPC-rostlagich yordamida takomillashtirilgan boshqarish algoritmlari ishlab chiqildi.

Tadqiqot yakunida quyidagi ilmiy natijalar olindi:

1. Moddiy balanslar, reaksiyalar kinetikasi, massa va issiqlik almashinishini o‘z ichiga olgan karbonizatsiya jarayonining umumlashtirilgan matematik modeli ishlab chiqildi. Sanoat ma’lumotlari asosida o‘tkazilgan verifikatsiya modelning adekvatligini tasdiqladi, bu yerda maksimal nisbiy xatolik 4,7 % dan oshmadi.

2. Dinamik model asosida karbonizatsiya kolonnasining holatlar fazosidagi LPV-ko‘rinishi shakllantirildi. Bu esa real vaqt rejimida MPC algoritmining hisoblash imkoniyatini saqlagan holda obyektning nochiziqligi va nostatsionarligini hisobga olishga imkon berdi. Harorat, karbonizatsiya darajasi, o‘ta to‘yinish va $NaHCO_3$ konsentratsiyasi bo‘yicha cheklovlarni hisobga olib, CO_2 va tuzli eritma sarfiga, sovutish hamda bosimga kelishilgan holda ta’sir ko‘rsatuvchi adaptiv MIMO-MPC boshqarish tizimining tizimi ishlab chiqildi.

3. Imitatsion modellashtirish natijalari taklif etilgan MPC-rostlagichning noaniq PID-rostlagichga nisbatan afzalliklarini tasdiqladi. Integral mutlaq xatolik 12,5 dan 5,3 gacha, integral kvadratik xatolik 18,2 dan 6,8 gacha kamaytirildi; rostlanish vaqti 180 s dan 90 s gacha, o‘ta rostlanish esa 22 % dan 8 % gacha qisqartirildi. Binobarin, rostlash aniqligi ikki barobardan ziyod oshirildi va o‘tish

jarayonining davomiyligi ikki barobarga qisqardi.

4. Turg‘unlikni tadqiq qilish natijalari kinetik koeffitsiyentlar ±20 % ga va issiqlik almashinish koeffitsiyenti ±15 % ga o‘zgarganda ham tizimning barqaror ishlashini ko‘rsatdi. Bu esa sanoatdagi tebranishlar sharoitida tizimning robastlik zaxirasi yetarli ekanligini tasdiqlaydi.

5. Karbonizatsiya jarayonining amaldagi TJABTga MPC tizimini sanoat miqyosida joriy etish arxitekturasi taklif qilindi. U SCADA-tizim darajasi, sanoat kontrolleri, mahalliy PID-konturlar va o‘lchash asboblarini o‘z ichiga oladi. Bu esa mavjud avtomatlashtirish tizimini tubdan o‘zgartirmasdan intellektual boshqaruvni joriy qilish imkonini beradi.

6. Texnik-iqtisodiy tahlil shuni ko‘rsatdiki, ishlab chiqilgan tizimni qo‘llash CO_2 sarfini taxminan 8 % ga, NH_3 sarfini 6 % ga, energiya xarajatlarini 10 % ga kamaytirishga hamda asosiy mahsulot unumini qariyib 5 % ga oshirishga imkon beradi.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/2025.27.12.T.02.03 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ТАШКЕНТСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ИСЛАМА КАРИМОВА

ИСХАКОВА ФАТИМА ФАХРИТДИНОВНА

УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КАРБОНИЗАЦИИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ

05.01.08 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ТЕХНИЧЕСКИМ НАУКАМ

Ташкент – 2026

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Академии наук Республики Узбекистан за номером B2026.3.PhD/T6988.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете.

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

Научный руководитель:	**Юсупбеков Нодирбек Рустамбекович** доктор технических наук, профессор, академик АН РУз
Официальные оппоненты:	**Иваньян Арсен Игнатович** Доктор технических наук (DSc)
	Хамидов Баходир Таджиддинович кандидат технических наук, доцент
Ведущая организация:	**АО «Узкимесаноатлойиха»**

Защита диссертации состоится «7» 12 2026 года в 14[00] часов на заседании Научного совета DSc.03/2025.27.12.T.02.03 при Ташкентском государственном техническом университете (Адрес: 100095, г.Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел: (99871) 246-46-00; факс: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_info@tdtu.uz).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского государственного технического университета (зарегистрировано №179 (Адрес: 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2. Тел.: (99871) 207-14-70).

Автореферат диссертации разослан «23» 11 2026 года.
(реестр протокола рассылки №21 от «2» 11 2026 года)

Ф.Т.Адилов
Заместитель председателя научного совета по присуждению ученых степеней, доктор технических наук, профессор

У.Ф.Мамиров
Ученый секретарь научного совета по присуждению учёных степеней, доктор технических наук, профессор

Х.З. Игамбердиев
Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению учёных степеней, д.т.н., профессор, академик АН РУз

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и необходимость темы диссертации. В последние годы в мире особое внимание уделяется автоматизированным системам управления сложными химико-технологическими процессами, в частности, использованию методов математического моделирования и прогнозного управления. Перспективными считаются разработки, направленные на достижение энерго- и ресурсосбережения при управлении процессом карбонизации в производстве кальцинированной соды, а также на создание моделей, алгоритмов и систем, обеспечивающих стабильность качества продукции. В этом контексте одной из актуальных задач является построение адекватной динамической модели процесса карбонизации и разработка на ее основе систем прогнозирующего управления, учитывающих изменения технологических параметров процесса.

В мире ведутся научные исследования, направленные на математическое моделирование сложных технологических процессов на промышленных предприятиях и разработку систем управления на основе современных технологий. В этом направлении, в частности, актуальным является создание математических моделей, методов и алгоритмов, позволяющих строить системы прогнозирования состояния технологических процессов и изменения их параметров в режиме реального времени. В связи с этим особое внимание уделяется разработке математических моделей, учитывающих термодинамические, кинетические и динамические свойства процесса карбонизации, а также созданию на их основе усовершенствованных алгоритмов управления, позволяющих прогнозировать изменения технологических параметров.

В настоящее время в нашей республике особое внимание уделяется развитию научно-технических направлений автоматизации и управления технологическими процессами и производствами, в частности, совершенствованию систем управления, обеспечивающих энерго-и ресурсосбережение, стабильность и качество продукции. Одним из приоритетных направлений является разработка и внедрение интеллектуальных систем управления сложными химико-технологическими процессами, включая производство кальцинированной соды. В Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы, в частности, определены задачи «... сокращения энерго и ресурсоемкости экономики, внедрения в производство энергосберегающих технологий, повышения производительности труда в отраслях экономики»[1]. При реализации этих задач, в том числе при производстве кальцинированной соды, одной из важных задач является разработка усовершенствованных систем управления процессом карбонизации.

[1] Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № ПФ–60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, определенных в Указах Президента Республики Узбекистан No УП-36 «О дополнительных мерах по обеспечению продовольственной безопасности в республике» от 16 февраля 2024 года, No УП-3682 «О мерах по дальнейшему совершенствованию системы внедрения инновационных идей, технологий и проектов» от 27 апреля 2018 года, No УП-169 «О дополнительных мерах по ускоренному развитию промышленности и ее базовых отраслей» от 12 октября 2023 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

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

Степень изученности проблемы. В ведущих научных центрах и высших образовательных учреждениях мира проводятся научные исследования, направленные на развитие высокоэффективных систем управления сложными химико-технологическими процессами, в том числе процессами абсорбции, кристаллизации и разделения веществ. В частности, данные исследования активно ведутся в компаниях «Honeywell», «Siemens», «Aspen Tech», в Massachusetts Institute of Technology (США), Delft University of Technology (Нидерланды), Tsinghua University (Китай), Osaka University и Tokyo Institute of Technology (Япония) и других научных центрах. Исследования в этих научных институтах направлены на разработку методов математического моделирования сложных многофазных процессов, создание систем интеллектуального и предиктивного управления, развитие концепции цифровых двойников и интеллектуальных систем управления, обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение технологических процессов, а также на повышение устойчивости и качества работы аппаратов.

Значительный вклад в развитие теории и практики моделирования и управления сложными технологическими процессами внесли зарубежные ученые: J.B.Rawlings[2], J.Qin[3], S.Skogestad[4], V.Cristea[5], X.Jin[6], P.Wylock[7], B.Haut[8], A.M.Cormos[9], A.Saberi[10], A.S.Goharrizi[11], H.Zhang[12], А.Г.Афанасенко[13] и другие.

[2] Rawlings J.B., Mayne D.Q. Model Predictive Control: Theory and Design. – Madison: Nob Hill, 2009. – 566 p.
[3] Qin S.J., Badgwell T.A. A survey of industrial model predictive control technology. // Control Engineering Practice. – 2003. – Vol. 11, No. 7. – P. 733–764.
[4] Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control: Analysis and Design. – 2nd ed. – Chichester: Wiley, 2005. – 559 p.
[5] Cristea V.-M. Control Approaches of the Carbonation Column for Soda Manufacturing // Studia UBB Chemia. – 2017. – V. LXII, № 4, P. II. – C. 221–229. – DOI: 10.24193/subbchem.2017.4.19.
[6] Xiaoming Jin, Shuji Z., Wenlie L., Deying Z., Xinchun Z. On Applying Model Predictive Control for Carbonation Towers in Manufactory of Soda Ash // Information Technology Journal. – 2013. – Т. 12, № 19. – С. 4911–4917. – DOI: 10.3923/itj.2013.4911.4917.
[7] Wylock C., Larcy A., Cartage T., Haut B., Compartmental modelling of an industrial bubble column / 8th world congress of chem eng (WCCE8), Chemical Engineering Unit, Université Libre de Bruxelles), (2009).
[8] Benoît Haut, Véronique Halloin, Thierry Cartage, Arnaud Cockx. Production of sodium bicarbonate in industrial bubble columns // Chemical Engineering Science. – 2004. – Vol. 59. – P. 5523–5535. – DOI:

Их исследования направлены на разработку методов построения динамических моделей, синтез предиктивных алгоритмов управления, анализ многосвязных систем и оптимизацию сложных химико-технологических процессов, включая процессы карбонизации и кристаллизации.

В нашей стране известные ученые Н.Р. Юсупбеков [14], Х.З. Игамбердиев[15], Ш.М. Гулямов[16], Д.П. Мухитдинов[17], И.Х. Сиддиков[18], М.А. Исмаилов [19], З.Э. Искандаров [20] и другие внесли значительный вклад в развитие методов математического моделирования, оптимизации и автоматизации технологических процессов, в том числе процессов химической технологии и разделения многокомпонентных систем.

Несмотря на значительный объем выполненных исследований, в последние годы технологические процессы, в частности процесс карбонизации аммонизированного рассола, претерпели значительные изменения, существенно усложнились, что связано с необходимостью повышения энергоэффективности, снижения расхода сырья, ужесточением экологических требований и ростом требований к качеству продукции. Это требует перехода от традиционных локальных систем регулирования к интеллектуальным системам управления, способным учитывать нелинейную динамику, межканальные связи и технологические ограничения.

Вместе с тем в литературе недостаточное внимание уделяется разработке комплексных подходов, объединяющих динамическое моделирование, предиктивное управление и цифровые технологии в едином контуре управления процессом карбонизации. Отсутствуют интегрированные решения, позволяющие одновременно учитывать кинетику реакций,

---

10.1016/J.CES.2004.07.110.

[9] Ana-Maria Cormos, Paul Serban Agachi. Modeling and Simulation of Carbonation Process of Brine for Obtaining Sodium Carbonate // Revista de Chimie. – 2006. – Vol. 57. – No. 2. – P. 130–137.

[10] Saberi A., Goharrizi AS., Ghader S., Precipitation kinetics of sodium bicarbonate in an industrial bubble column crystallizer. Cryst Res Technol 44(2), (2009), 159–166.

[11] Goharrizi AS., Abolpour B. Estimation of sodium bicarbonate crystal size distributions in a steady-state bubble column reactor. Res Chem Intermed 38(7), (2012), 1389–1401.

[12] Zhang H., Wang Y., Li C. Application of neural network-based predictive models in soda ash production // Chemical Engineering Journal. – 2020. – Vol. 389. – Article 124332.

[13] Афанасенко А.Г., Веревкин А.П. Нейросетевое моделирование показателей качества процесса карбонизации. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, Уфа: УГАТУ, 2009, Т. 13, № 2 (35), с. 222–225.

[14] Юсупбеков Н.Р., Зокиров С.Г., Нурмухамедов Х.С. Кимёвий технология асосий жараён ва қурилмалари: назария, ҳисоб, лойиҳа. – Тошкент: «Sharq» нашриёт-матбаа акциядорлик компанияси, 2023. – 608 б.

[15] Х.З.Игамбердиев "Теория автоматического управления" “Zuxro baraka biznes” 2024. - 680 б.

[16] Sh.Gulyamov, Yu.Avazov, E.Samadov, N.Khojiyeva, Q.Bazarbaeva. Some issues of increasing energy efficiency of advanced process and production control systems // AIP Conference Proceedings 2025.

[17] D.Mukhitdinov, Yo.Kadirov, V. Shamsutdinova, G. Chulieva, D.Abdullaeva. Fuzzy MIMO model for efficient control of complex processes with uncertainties and nonlinearities // E3S Web of Conferences. – 2024.

[18] I.X. Siddikov, D.M. Umurzakova, O.V. Porubay, T.M. Abdullayev. Impact of Steady-State Error Minimization on the Performance of Numerical Optimization Techniques in Linear Automatic Control Systems // Journal of Robotics and Control (JRC). – 2025. – Vol. 6. – No. 6.

[19] F.Kasimov, Ru Jiang, Dong Zhang, M.Ismailov. Development of a Control Device and Algorithm for Autonomousmoving Systems // Chemical Technology, Control and Management. Vol. 2(92). – 2020. — pp. 62-69.

[20] Z. Iskandarov, T. Avezov, U. Khujanazarov. Fuzzy control system for yarn tension in the warping process // AIP Conference Proceedings. – 2025.

процессы массопереноса, кристаллизации и ограничения технологического режима в рамках алгоритмов управления.

В этой связи разработка усовершенствованных методов моделирования и предиктивного управления процессом карбонизации является актуальной научной задачей, направленной на повышение эффективности, устойчивости и надежности функционирования технологических процессов производства кальцинированной соды.

Соответствие диссертационного исследования научно-исследовательской деятельности высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертация. Диссертационное исследование выполнено в рамках следующих проектов научно-исследовательских работ Ташкентского государственного технического университета: ОТ-Ф7-88 – «Совершенствование теоретических основ перспективных сложных химико-технологических систем энерго-и ресурсосберегающих процессов тепломассообмена для получения чистой продукции» (2017-2020 гг.) и FL-9524115110 – «Научно-теоретические основы применения искусственного интеллекта и цифровизации в управлении сложными технологическими процессами и производствами на основе стратегии «Индустрия 4.0»» (2025-2029 гг.).

Целью исследования является разработка математического обеспечения для управления процессом карбонизации аммонизированного рассола на основе термодинамико-кинетических и динамических моделей.

Задачи исследования:

математическое описание и анализ современных методов управления карбонизацией аммонизированного солевого раствора, выявление основных факторов, влияющих на эффективность процесса и качество продукции, а также оценка ограничений существующей системы автоматического управления;

разработка и утверждение динамической математической модели процесса карбонизации на основе экспериментальных и промышленных данных, учитывающей кинетику реакций, тепло-и массообмен, гидродинамику газожидкостной системы и закономерности кристаллизации гидрокарбоната натрия;

разработка LPV-представления процесса карбонизации и на его основе синтез многомерной системы модельно-предиктивного управления (MPC), обеспечивающей координированное регулирование основных технологических параметров с учётом технологических ограничений и неопределённостей;

разработка виртуального анализатора для оценки трудноизмеряемых параметров процесса и исследование возможность его интеграции в структуру автоматизированной системы управления колонной карбонизации;

имитационное моделирование и сравнительный анализ разработанной MPC-системы и традиционных методов регулирования, а также оценка технико-экономической эффективность её промышленного внедрения.

Объект исследования система управления процессом карбонизации аммонизированного рассола в производстве кальцинированной соды.

Предмет исследования: модели и алгоритмы методы, модели и алгоритмы математического моделирования, идентификации, предиктивного управления и оптимизации режимов карбонизационной колонны.

Методы исследования. Исследования проводились с применением методов системного анализа, математического моделирования, интеллектуального и нечеткого управления, а также оптимизации и прогнозирования сложных динамических объектов.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

разработана динамическая математическая модель процесса карбонизации с учетом кинетики химических реакций, процессов тепло-и массообмена, гидродинамических свойств газожидкостной системы и закономерностей кристаллизации бикарбоната натрия;

предложен подход к представлению нелинейной модели карбонизационной колонны в виде модели с переменными параметрами на основе параметризации матриц пространства состояний через текущие технологические переменные, позволяющий использовать линейные методы синтеза управления для объекта;

разработана структура многомерной системы модельно-прогностического управления процессом карбонизации, обеспечивающей скоординированное управление взаимосвязанными технологическими параметрами с учетом управляющих воздействий и ограничений на контролируемые переменные;

предложен виртуальный анализатор, основанный на математической модели физико-химических процессов и предназначенный для оценки качественных параметров процесса карбонизации, которые трудно измерить в режиме реального времени.

Практические результаты исследования состоят в следующем:

разработанные математическая модель и программный комплекс могут использоваться для анализа, оптимизации и прогнозирования режимов работы карбонизационных колонн в производстве кальцинированной соды;

предложенная MPC-система обеспечивает повышение качества управления многосвязным процессом карбонизации за счёт координированного регулирования взаимосвязанных технологических параметров и учёта технологических ограничений;

разработанный виртуальный анализатор позволяет осуществлять оперативный контроль трудноизмеряемых показателей процесса и корректировать режим работы установки в реальном времени;

внедрение результатов работы в действующие АСУ ТП способствует повышению выхода $NaHCO_3$ требуемого качества, снижению расхода CO_2 и энергоресурсов и повышению устойчивости технологического режима.

Достоверность результатов исследования подтверждается использованием современных методов математического моделирования и управления динамическими системами, точностью применяемого математического аппарата и работоспособностью разработанных алгоритмов предиктивного управления, а также соответствием результатов аналитических исследований, компьютерного моделирования и вычислительных экспериментов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследования заключается в развитии теоретических и методических основ управления сложными нелинейными многосвязными химико-технологическими объектами, совершенствование методов модельно-предиктивного управления многофазными процессами и расширение научных представлений о цифровом управлении процессами карбонизации аммонизированного рассола.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке математической модели процесса карбонизации, виртуального анализатора и алгоритмов прогнозного управления на основе модели, позволяющих повысить качество и стабильность технологического режима, увеличить целевой выход продукции, снизить удельный расход энергии и реагентов, а также модернизировать действующие автоматизированные системы управления производством кальцинированной соды.

Внедрение результатов исследований. На основе полученных научных результатов по совершенствованию управления процессом карбонизации:

динамическая математическая модель процесса карбонизации внедрена в ООО «Кунградский содовый завод» (справка АО «Узкимёсаноат» №14-2199 от 21 августа 2026 г.). В результате обеспечено обеспечила прогнозирование технологических параметров с максимальной относительной погрешностью не более 4,7 %;

система многомерного модельно-предиктивного управления внедрена в ООО «Кунградский содовый завод» (справка АО «Узкимёсаноат» №14-2199 от 21 августа 2026 г.). В результате обеспечено более чем двукратное повышение точности регулирования и двукратное сокращение длительности переходного процесса;

виртуальный анализатор внедрен в ООО «Кунградский содовый завод» (справка АО «Узкимёсаноат» №14-2199 от 21 августа 2026 г.). В результате обеспена оперативная оценка трудноизмеряемых параметров в режиме реального времени.

Апробация результатов исследования. Результаты данного исследования обсуждались на 2 международных и 2 республиканской научно-практических конференциях.

Публикация результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 5 научных статей в научных изданиях, рекомендованных к публикации Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан по основным научным результатам

докторских диссертаций, в том числе 1 статья опубликована в зарубежном журнале, а также для 2 созданных программных средства для ЭВМ получены свидетельства о регистрации в Агентстве по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Объём диссертации составляет 116 страница.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и необходимость проводимых исследований, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет работы, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, изложены научная новизна и практические результаты, раскрыта научная и практическая значимость полученных выводов, приведены сведения о внедрении результатов, опубликованных работах и структуре диссертации.

В первой главе выполнен анализ современных подходов к управлению процессом карбонизации аммонизированного рассола. Установлено, что существующие системы управления основаны преимущественно на локальном регулировании и недостаточно учитывают взаимосвязь технологических параметров. Обоснована необходимость разработки динамической модели процесса для синтеза системы модельно-предиктивного управления.

Во второй главе разработана и исследована математическая модель процесса карбонизации аммонизированного рассола.

Установлено, что процесс карбонизации является ключевой стадией аммиачно-содового производства, определяющей выход, качество и морфологические характеристики кристаллов бикарбоната натрия. Показано, что химический механизм процесса включает стадии абсорбции CO_2, образования промежуточных соединений, гидролиза и последующей кристаллизации $NaHCO_3$. На ранних стадиях процесса лимитирующей является химическая абсорбция диоксида углерода, тогда как при увеличении степени карбонизации возрастает влияние объёмных реакций и диффузионных процессов.

Для первичного количественного описания динамики целесообразно использовать модель суммарной реакции, позволяющую установить взаимосвязь между скоростью образования целевого продукта и изменением концентраций исходных веществ.

На основе принятых допущений вводятся условные обозначения компонентов ($NaCl - A$; $NH_4OH - B$; $CO_2 - C$; $NaHCO - E$; $NH_4Cl - F.$), после чего система реакций представляется в компактной форме (1)-(2).

$$NaCl + NH_4OH + CO_2 = NaHCO_3 + NH_4Cl, \quad (1)$$

$$A + B + C \rightarrow E(k_1) + F(k_2). \quad (2)$$

Динамика процесса описывается на основе закона действующих масс и формализуется выражениями (3)-(4), учитывающими вклад как прямых, так и обратных превращений в суммарную скорость реакции:

$$D(t,c)=\begin{cases}\dfrac{\partial C_A}{\partial t}=-(k_1+k_2)\cdot C_A\cdot C_B\cdot C_c,\\ \dfrac{\partial C_B}{\partial t}=-(k_1+k_2)\cdot C_A\cdot C_B\cdot C_c,\\ \dfrac{\partial C_C}{\partial t}=-(k_1+k_2)\cdot C_A\cdot C_B\cdot C_c,\\ \dfrac{\partial C_E}{\partial t}=k_1\cdot C_A\cdot C_B\cdot C_c,\\ \dfrac{\partial C_F}{\partial t}=k_2\cdot C_A\cdot C_B\cdot C_c.\end{cases} \tag{3}$$

где: C_A, C_B и C_C – концентрации соответствующих веществ, измеряемых в моль/л; k_1 и k_2 – константы скорости химической реакции.

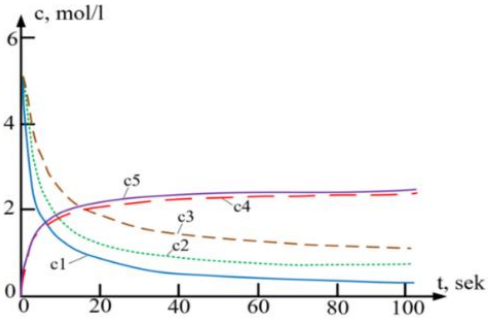
$$D(t,c)=\begin{bmatrix}-(k_1+k_2)\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3\\ -(k_1+k_2)\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3\\ -(k_1+k_2)\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3\\ k_1\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3\\ k_2\cdot c_1\cdot c_2\cdot c_3\end{bmatrix}. \tag{4}$$

В вычислительном эксперименте были использованы исходные концентрации и значения констант скоростей:

C_1=1; C_2=1.1; C_3=1.2; C_4=0; C_5=0; k_1=1; k_2= k_1+0,02.

Численное решение системы выполнено методом Рунге-Кутты четвёртого порядка в среде Mathcad. Результаты моделирования позволили (рис.1), исследовать закономерности образования гидрокарбоната натрия и накопления хлорида аммония во времени.

На основе экспериментальных данных выполнена идентификация основных технологических связей и получены аппроксимационные зависимости производительности колонны по $NaHCO_3$ от температуры процесса (рис.2), содержания связанного NH_4Cl от температуры зоны кристаллизации (рис.3), а также зависимости размеров абсорбционной и охлаждающей зон от расхода диоксида углерода (рис.4).



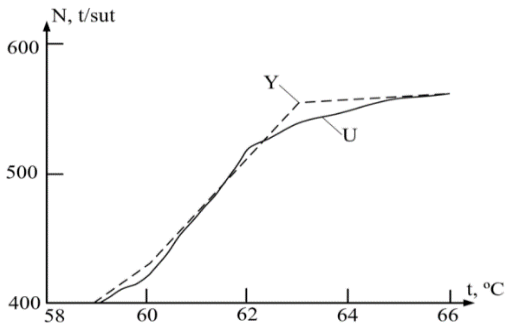


Рис. 1. Графики кинетики химической реакции карбонизации.

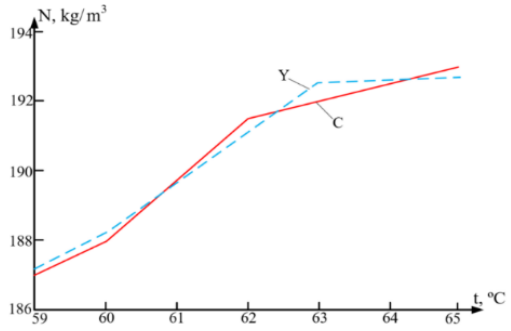


Рис. 2. Влияние температуры на образование $NaHCO_3$.

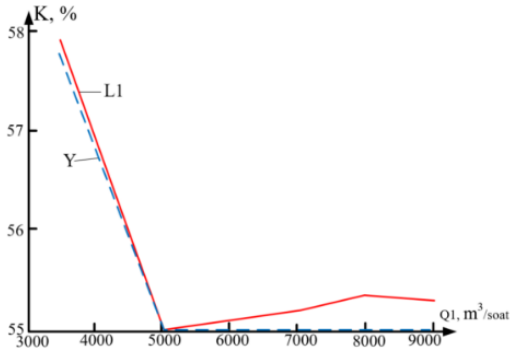


Рис. 3. Влияние температуры на концентрацию NH_4Cl в суспензии

Рис. 4. Зависимость величины холодильной зоны от расхода CO_2

Ошибка моделирования определялась по способу: $SOR=\Sigma(Y-L_1)^2$ и составила 0,265, что является допустимой.

Установлено, что температура является одним из определяющих факторов, влияющих как на выход гидрокарбоната натрия, так и на содержание связанного аммоний хлорида NH_4Cl в суспензии.

Тем не менее, эмпирические зависимости не отражают внутреннюю структуру процесса, что требует перехода к более общей динамической постановке.

Для описания процесса в динамике разработана нелинейная математическая модель в пространстве состояний. При построении модели использованы уравнения химической кинетики, материального и теплового балансов, а также соотношения массопереноса и диффузии. В основу модели положены закон действующих масс и уравнение Аррениуса, позволяющие учитывать влияние температуры на скорость химических реакций.

Закон действующих масс утверждает, что скорость реакции напрямую зависит от произведения концентраций участвующих веществ, каждая концентрация возводится в степень, соответствующую ее стехиометрическому коэффициенту в уравнении, описывающем реакцию.

$$r_j = k_j(T)\prod_{i=1}^{n} C_i^{v_{ij}},$$

где: $k_j(T)$ – константа скорости; v_{ij} – стехиометрические коэффициенты.

Обобщенное дифференциальное уравнение для описания изменения концентраций веществ в процессе карбонизации можно записать в следующем виде:

$$d[C_i]/dt = R_i(C_1, C_2, ..., C_n, T, P) + D_i + F_i,$$

где: C_i – концентрации всех веществ, участвующих в реакции (моль/л); t – время (с); R_i – функция, характеризующая скорость образования или расходования i-го компонента; T – температура системы (К); P – давление (Па); D_i – диффузия; F_i – конвективный перенос.

В векторно-матричной форме это уравнение можно представить в

следующем виде:

$$\frac{dC}{dt} = S_r(C,T) + D + F,$$

где: S – стехиометрическая матрица.

Далее разработана стехиометрическая матрица химических превращений, обеспечивающая формализованное описание взаимосвязей между компонентами реакционной системы. На её основе получена система нелинейных дифференциальных уравнений, описывающая изменение концентраций компонентов в пространстве и во времени с учётом конвективного и диффузионного переноса вещества.

Для более наглядного представления это уравнение можно переписать в следующем виде:

$$\frac{dCx_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n} v_{ij}\omega_j,\ i = \overline{1,m}.$$

Тепловой баланс процесса описывается соотношением:

$$pc_p \frac{dT}{dt} = Q_{реак} + Q_{теплообмен}.$$

С учётом пространственной неоднородности динамику концентраций можно переписать в следующем виде:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = R_i + D_i \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} - v\frac{\partial C_i}{\partial z}.$$

Построенная на основе представленных данных кинетическая модель может быть ценным инструментом для понимания, оптимизации и управления процессом карбонизации, а также для разработки новых технологий и материалов. Она позволяет получить глубокое представление о процессе, прогнозировать его поведение, оптимизировать режимы работы, синтезировать алгоритмы управления (MPC/NMPC), а также создавать более эффективные решения.

Проведена валидация разработанной модели. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало удовлетворительную точность описания процесса. Максимальная относительная погрешность не превышает 4,7 %, что подтверждает адекватность модели и возможность её использования для прогнозирования и оптимизации режимов карбонизации.

Полученная модель обладает свойствами, необходимыми для решения задач оптимального управления: учитывает динамический характер процесса, многосвязность технологических переменных, допускает введение технологических ограничений и обеспечивает прогнозирование поведения объекта на конечном горизонте времени.

В третьей главе разработана система модельно-предиктивного управления процессом карбонизации аммонизированного рассола.

Показано, что карбонизационная колонна характеризуется выраженной нелинейностью, многосвязностью, наличием технологических ограничений и

изменением динамических свойств при переходе между различными режимами эксплуатации. В связи с этим традиционные методы регулирования не обеспечивают требуемого качества управления.

Сформулирована задача синтеза системы Model Predictive Control (MPC) как задача многомерного оптимального управления с учётом ограничений на управляющие и регулируемые переменные. Определены управляющие воздействия, контролируемые параметры и основные возмущающие факторы процесса. Разработана структура MPC-регулятора, включающая прогнозирующую модель объекта, блок оптимизации, контур обратной связи и механизм скользящего горизонта. Предложенная система обеспечивает формирование управляющих воздействий на основе прогнозирования будущего поведения объекта и решения задачи оптимизации на каждом шаге управления.

Постановку задачи синтеза системы можно представить в виде у:

$$x_{k+1} = A(p_k)x_k + B(p_k)u_k,$$

$$y_k = C(p_k)x_k$$

и функционала оптимизации:

$$J = \sum_{i=1}^{N_P} (y_{k+i} - y_{ref})^T Q(y_{k+i} - y_{ref}) + \sum_{i=0}^{N_{c-1}} \Delta u_{k+i}^T R \Delta u_{k+i}.$$

Для формирования предиктора использована дискретная модель пространства состояний, учитывающая управляющие воздействия, внешние возмущения и контролируемые выходные переменные. Выполнено обоснование выбора горизонтов прогнозирования и управления, а также весовых коэффициентов функционала качества.

На рисунке 5 приведена структурная схема системы управления, функционирующей по принципу модельно-предиктивного регулирования, в которой управляющее воздействие формируется на основе прогноза динамики объекта и решения задачи оптимизации на конечном горизонте.

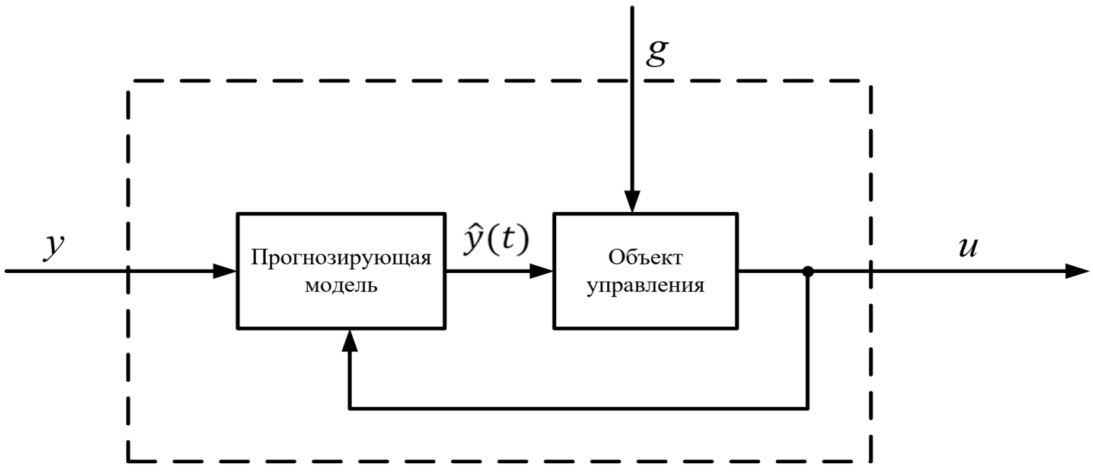


Рис. 5. Схема организации автоматического управления объектом с применением регулятора на базе MPC.

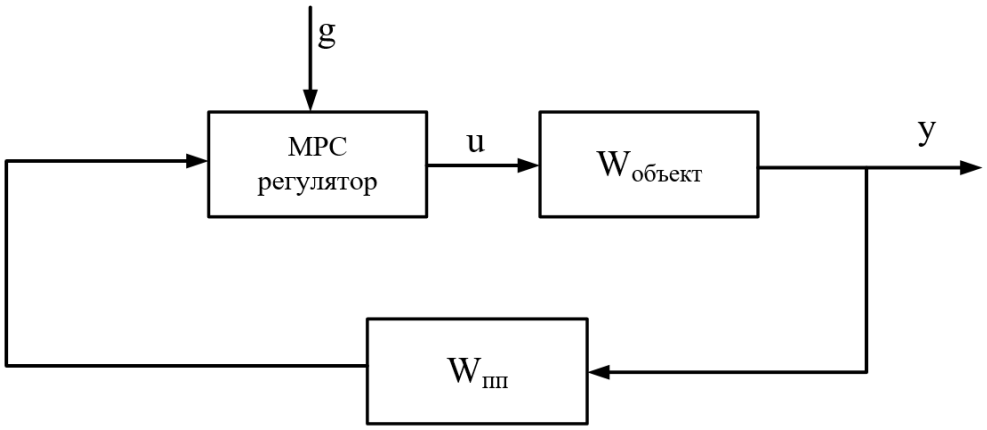


Рис. 6. Структурная схема системы управления с MPC-регулятором, включающим прогнозирующую модель объекта и блок оптимизации.

Рисунок 6 иллюстрирует более обстоятельную структуру системы управления, где ключевую роль играет MPC-регулятор. В его состав входят прогнозная модель управляемого объекта и блок оптимизации. В данной структуре прогнозирующая модель используется для расчёта будущих траекторий выходных переменных, а блок оптимизации обеспечивает выбор оптимального управляющего воздействия с учётом заданных критериев качества и ограничений на входные и выходные параметры системы.

Использование прогнозирующих свойств MIMO-модели даёт возможность оценивать эволюцию состояния объекта на заданном горизонте предсказания, что существенно расширяет функциональные возможности системы управления и повышает её эффективность. Пример прогнозирования значений контролируемых параметров объекта на нескольких шагах упреждения приведён на рисунке 7.

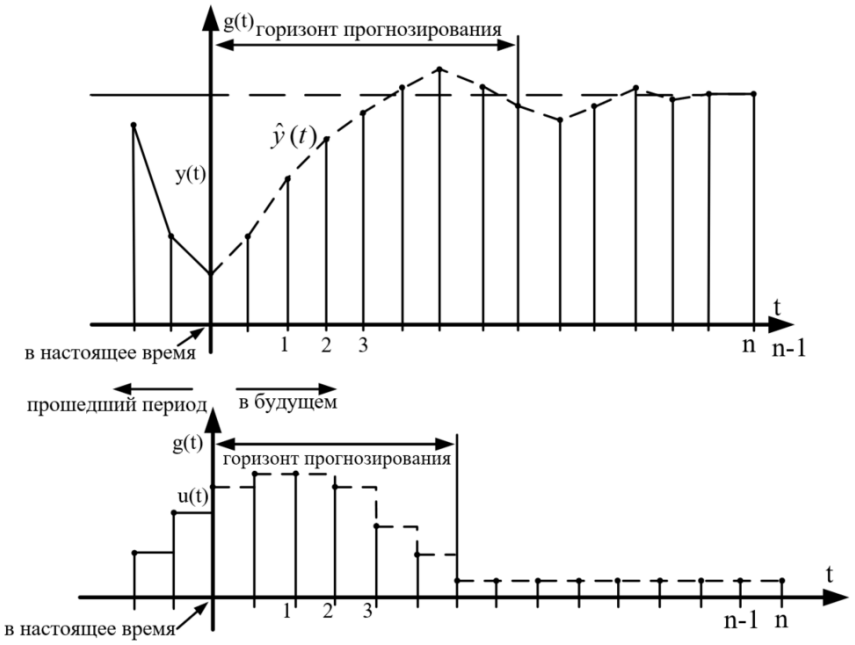


Рис.7. Прогноз значений контролируемых параметров объекта на нескольких шагах упреждения.

Рассчитанное управляющее воздействие *u(t)* передаётся на объект управления и реализуется в технологическом контуре. На последующем шаге, после поступления обновлённых измерений состояния процесса, выполняется повторная процедура оптимизации, в результате которой формируется новое значение управляющей переменной.

Таким образом, управление осуществляется по принципу рекуррентного пересчёта, обеспечивающего коррекцию управляющих воздействий с учётом актуальной информации о состоянии объекта.

Графическая иллюстрация принципа работы MPC-регулятора представлена на рисунке 8.

Особое внимание уделено учёту нелинейности объекта. Для этой цели предложено использовать LPV-представление (Linear Parameter Varying), в котором параметры модели изменяются в зависимости от текущего режима функционирования колонны. Такой подход позволяет учитывать изменение температуры, степени карбонизации, концентрации аммиака и расхода диоксида углерода без перехода к вычислительно сложным алгоритмам нелинейного предиктивного управления.

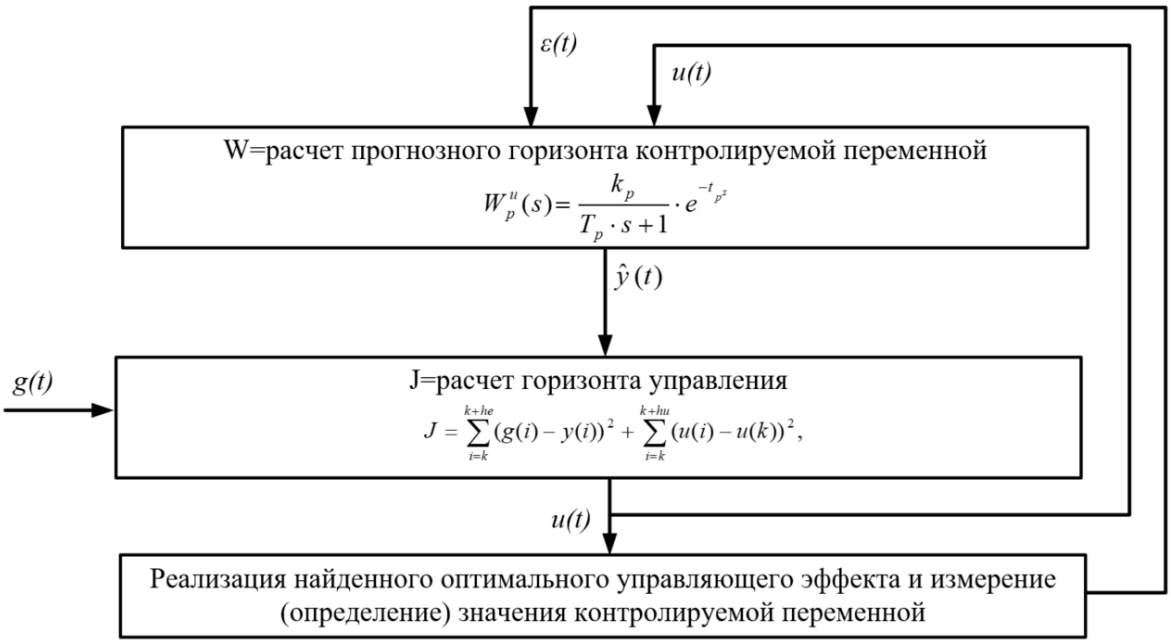


Рис. 8. Иллюстрация принципа работы MPC-регулятора.

В четвёртой главе выполнено имитационное моделирование и исследование эффективности разработанной системы управления.

Для проведения вычислительных экспериментов разработана интегрированная среда моделирования в MATLAB/Simulink, включающая динамическую модель процесса карбонизации, алгоритм MPC, блоки формирования возмущений и средства численного анализа.

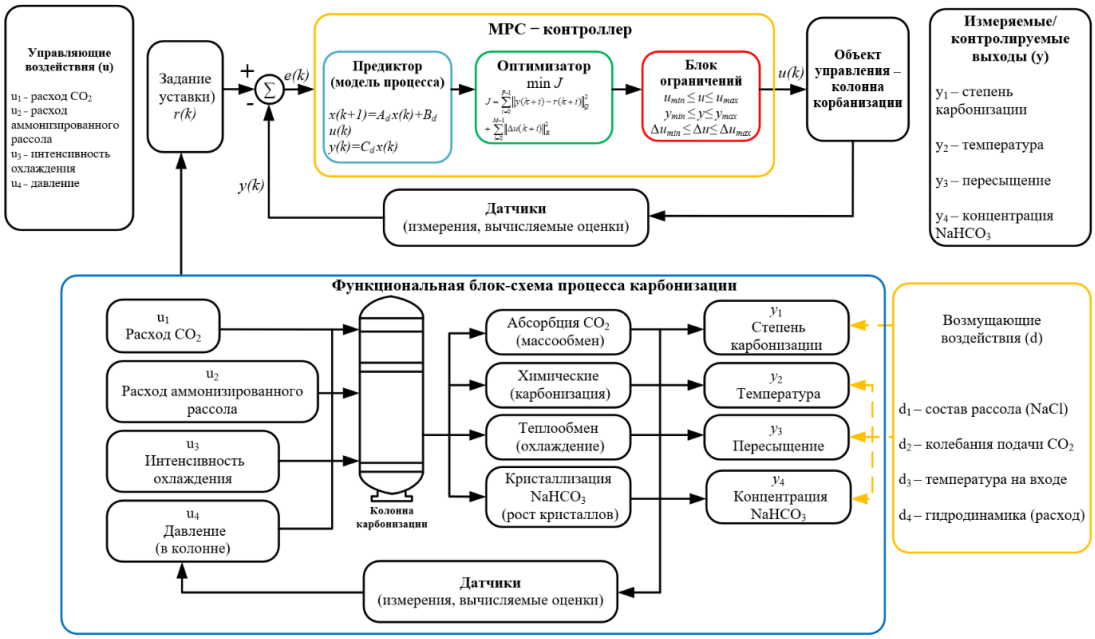


Рис. 9. Структурно имитационная модель системы управления процессом карбонизации с MPC-регулятором.

Структурно имитационная модель построена как многовходовая – многовыходовая (MIMO) система, отражающая физико-химическую природу процесса карбонизации как объекта с распределёнными параметрами и выраженными перекрёстными связями (рисунок 9).

Имитационная модель системы управления в программе Matlab представлена на рисунке 10. Сформированная среда моделирования позволяет исследовать как динамику отдельных каналов, так и общее поведение многосвязочной системы в замкнутом контуре управления.

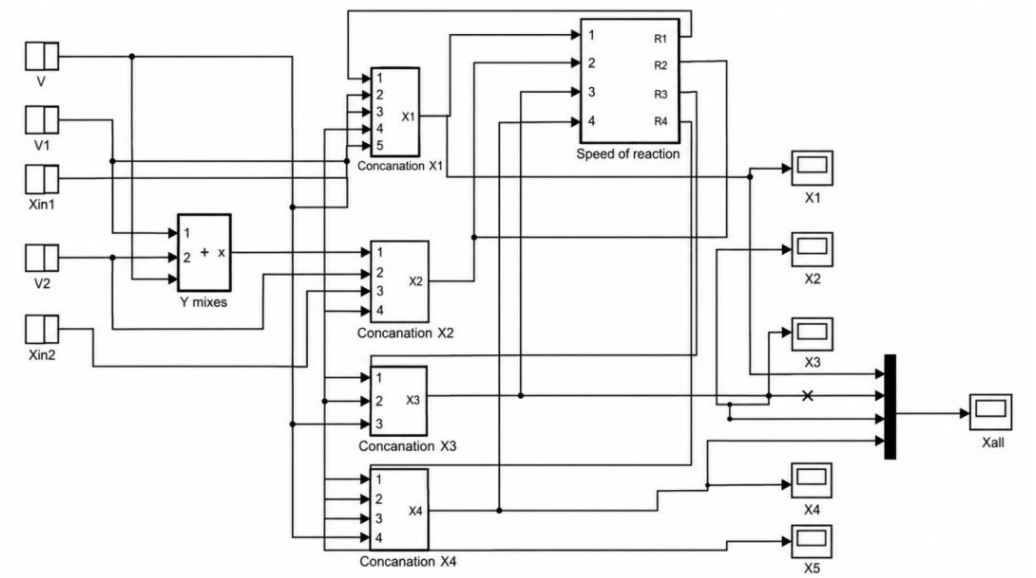


Рис.10. Имитационная модель системы управления.

Система управления содержит контуры регулирования уровня LIRC, температуры TIRC и расходов газовых смесей FIRC, оснащённые соответствующими датчиками уровня, температуры и расхода, а также

газоанализаторы АТ для контроля концентрации CO_2. Дополнительно в состав системы введён виртуальный анализатор, выполненный в виде микропроцессорного вычислительного устройства, реализующего математическую модель процесса карбонизации и предназначенного для определения трудноизмеряемых технологических параметров и показателей качества продукта в режиме реального времени.

Для оценки эффективности управления был сформирован набор типовых сценариев возмущений, включающих изменение состава солевого раствора, изменение расхода CO_2, воздействие температуры и нарушение режима.

Исследовано влияние параметров настройки МРС-регулятора на качество управления. Показано, что увеличение весов контролируемых переменных обеспечивает более быстрое достижение заданного режима, однако сопровождается ростом интенсивности управляющих воздействий. Определены рациональные значения горизонтов прогнозирования и управления, обеспечивающие компромисс между качеством регулирования и вычислительными затратами.

Проведено сравнение разработанной системы МРС с традиционной системой управления на основе нечёткого ПИД-регулятора. Результаты моделирования показали, что использование МРС позволяет сократить время выхода на режим со 180 до 90 сек, уменьшить перерегулирование с 22 до 8 %, снизить вариабельность качества продукта на 40 % и уменьшить энергопотребление примерно на 10 %.

Результаты сравнений приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Результаты сравнения разработанной системы МРС с традиционной системой управления на основе нечёткого ПИД-регулятора

Показатель	**Нечёткий ПИД регулятор**	**МРС**
Время установления переходного процесса	180 с	90 с
Перепегулирование	22 %	8 %
Энергопотребление	100 %	90 %

Из таблицы видно, что применение предиктивного управления обеспечивает более эффективную компенсацию внешних возмущений, улучшает устойчивость технологического режима и позволяет эксплуатировать оборудование вблизи технологических ограничений без нарушения требований безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации на основе моделирования сложных химико-технологических процессов и концепций теории интеллектуального и

прогностического управления разработаны усовершенствованные алгоритмы управления процессом карбонизации с помощью прогностического MPC-регулятора с MIMO-моделью.

По итогам исследования были получены следующие научные результаты:

1. Разработана обобщённая математическая модель карбонизации, включающая материальные балансы, кинетику реакций, массообмен и теплообмен, верификация по промышленным данным которой подтвердила адекватность модели с максимальной относительной погрешностью не выше 4,7 %.

2. На основе динамической модели сформировано LPV-представление карбонизационной колонны в пространстве состояний, что позволило учитывать нелинейность и нестационарность объекта при сохранении вычислительной реализуемости MPC в реальном времени. Разработана структура адаптивного MIMO-MPC управления, обеспечивающая согласованное воздействие на расход CO_2, расход рассола, охлаждение и давление с учётом ограничений по температуре, степени карбонизации, пересыщению и концентрации $NaHCO_3$.

3. Результаты имитационное моделирование подтвердило преимущество предложенного MPC-регулятора по сравнению с нечетким ПИД-регулированием. Интегральная абсолютная ошибка снижена с 12,5 до 5,3, интегральная квадратичная ошибка – с 18,2 до 6,8, время установления – со 180 до 90 с, перерегулирование – с 22 до 8 %. Следовательно, точность регулирования повышена более чем в 2 раза, а длительность переходного процесса сокращена в 2 раза.

4. Результаты исследование устойчивости показало стабильную работу системы даже при вариации кинетических коэффициентов в пределах ±20 % и коэффициента теплообмена на ±15 %, что подтверждает достаточный запас робастности системы в условиях производственных возмущений.

5. Предложена архитектура промышленного внедрения MPC в действующую АСУТП карбонизации, включающая уровень SCADA-системы, промышленный контроллер, локальные ПИД-контуры и измерительные приборы, что обеспечивает внедрение интеллектуального управления без радикальной перестройки существующей системы автоматизации.

6. Технико-экономическая оценка показала, что применение разработанной системы позволяет снизить расход CO_2 примерно на 8 %, расход NH_3 – на 6 %, энергозатраты – на 10 %, а выход целевого продукта увеличить примерно на 5 %.

SCIENTIFIC COUNCIL DSc.03/2025.27.12.T.02.03
ON THE ADMISSION OF SCIENTIFIC DEGREES
AT THE TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY

ISKHAKOVA FATIMA FAXRITDINOVNA

IMPROVED CONTROL OF THE CARBONIZATION PROCESS IN SODA ASH PRODUCTION

05.01.08 – Automation and control of technological processes and manafactures

ABSTRACT OF THE DISSERTATION OF DOCTOR OF PHILOSOPHY (PhD)
ON TECHNICAL SCIENCES

Tashkent – 2026

The theme of doctor of philosophy (PhD) was registered at the Supreme Attestation Commission at the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan under number B2026.3.PhD/T6988.

The dissertation has been prepared at Tashkent State Technical University.

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: **Yusupbekov Nodirbek Rustambekovich**
doctor of technical sciences, professor, academician

Official opponents: **Ivanyan Arsen Ignatyevich**
Doctor of Technical Scientific (DSc)

Xamidov Baxodir Tadjiddinovich
Candidate of Technical Scinces, Associate professor

Leading organization: **"Uzkimyosanoatloyiha" JSC**

Defense of dissertation will take place in «7» 12 2026 at 14^{00} o'clock at meeting of the scientific council DSc.03/2025.27.12.T.02.03 at the Tashkent state technical university (Address 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: 99871) 246-46-00; fax: (99871) 227-10-32; e-mail: tstu_@tdtu.uz).

The doctoral dissertation could be reviewed at the Information-resource center of Tashkent state technical university (registration number 179). (Address 100095, Tashkent, str. University-2, tel.: (99871) 207-14-70)

Abstract of dissertation sent out on «23» 11 2026 year.
(mailing report №21 on «2» 11 2026 year).

F.T.Adilov
Vice-Chairman of the scientific council,
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Scientific, Professor

U.F.Mamirov
Scientific secretary of the scientific council,
awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Scientific, associate professor

X.Z.Igamberdiyev
Chairman of the academic seminar under the
scientific council awarding scientific degrees,
Doctor of Technical Scientific, Professor, Academician

INTRODUCTION (abstract of PHD thesis)

The aim of the research develops mathematical support for managing the carbonization process of ammoniated salt solution based on thermodynamic-kinetic and dynamic models.

The object of the research work is the control system of the process of carbonization of ammoniated salt solution in the production of soda ash.

The scientific novelty of the research is as follows:

a dynamic mathematical model of the carbonization process has been developed, taking into account the kinetics of chemical reactions, heat and mass transfer processes, the hydrodynamic properties of the gas-liquid system, and the patterns of sodium bicarbonate crystallization;

an approach to representing a nonlinear model of a carbonization column in the form of a model with variable parameters based on parameterization of state space matrices through current technological variables has been proposed, allowing for the use of linear control synthesis methods for the object;

a structure for a multidimensional model-predictive management system for the carbonization process has been developed, ensuring coordinated control of interconnected technological parameters, taking into account control effects and constraints on controlled variables;

a virtual analyzer based on a mathematical model of physicochemical processes is proposed, designed to evaluate the quality parameters of the carbonization process that are difficult to measure in real time.

Implementation of the Research Results. Based on scientific results on improving the management of the carbonization process:

software for a dynamic mathematical model of the carbonization process has been implemented at “Kungrad Soda Plant” LLC (Certificate No. 14-2199 dated August 21, 2026, from JSC “Uzkimyosanoat”). As a result, it was possible to predict technological parameters with a maximum relative error of 4.7%;

a predictive management system based on a multidimensional model has been implemented at “Kungrad Soda Plant” LLC (Certificate No. 14-2199 dated August 21, 2026, from JSC “Uzkimyosanoat”). As a result, the adjustment accuracy was doubled, and the duration of the transition process was reduced by almost half;

the virtual analyzer was implemented at “Kungrad Soda Plant” LLC (Certificate No. 14-2199 dated August 21, 2026, from JSC “Uzkimyosanoat”). As a result, a rapid assessment of parameters that are difficult to measure in real time was achieved.

The structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, a conclusion, a list of references and an appendix. The total volume of the work is 116 pages of text.

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

I бўлим (Част I; Part I)

1. Yusupbekov N.R., Mukhitdinov D.P., Iskhakova F.F. Modeling of carbonization and absorption processes in soda ash production // Chemical Technology. Control and Management. 2025, Tashkent. № 3 (123). pp. 5–13 (05.00.00, №12) / DOI: https://doi.org/10.59048/2181-1105.1688

2. Исхакова Ф.Ф., Динамическая модель карбонизации аммонизированного рассола для задач прогнозирования и управления // Innovation science and technology, 2026, Ташкент, № 8, (05.00.00, №97) / DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.22755196

3. Yusupbekov N.R., Mukhitdinov D.P., Iskhakova F.F., Analysis of the carbonization process of ammoniated brine in ammonia-soda production // Chemical Technology. Control and Management. 2026, Tashkent. № 1 (127) pp.12-23 (05.00.00, №12) / DOI: https://doi.org/10.59048/2181-1105.1738

4. Yusupbekov N.R, Mukhitdinov D.P, Iskhakova F.F. Analysis of soda production processes in ammonia-soda production // Technical Science and Innovation. – 2026. – Vol. 2026. – Iss. 1. – Art. 1. – (05.00.00, №99) / DOI: https://doi.org/10.59048/2181-1180.1794

5. Gulyamov Sh.M., Iskhakova F.F. Construction of a Kinetic Model of the Carbonization Process in the Production of Caustic Soda // Lecture Notes in Networks and Systems (LNNS) (WCIS-2024). – Volume 2038 // Cham: Springer Nature Link, 2026. pp.135-141 **(Scopus)**. / DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-29635-1_18

II бўлим (Часть II; Part II)

1. Mukhitdinov D.P., Iskhakova F.F., Shamsutdinova V.X., Kadirov Yo.B, Systems advanced control of a non-stationary object with prognostic models // AIP Conf. Proc. 3268, 030023 (2025) **(Scopus).** / DOI: https://doi.org/10.1063/5.0257078

2. Исхакова Ф.Ф. Практическая оценка эффективности mpc-управления нестационарным технологическим объектом / Материалы VII-ой международной научно-технической конференции «Комплексное инновационное развитие Зарафшанского региона: достижения, проблемы и перспективы», Навои, 2026 г. – С. 277–279.

3. Исхакова Ф.Ф. Математическое обеспечение выбора технологических режимов карбонизационной колонны / “Markaziy Osiyoda oziq-ovqat sanoatini rivojlantirish masalalari” mavzusidagi xalqaro ilmiy-texnik anjuman to‘plami. – Toshkent, – 2026. – C. 341–342. – DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.23266616.

4. Isxakova F.F. Model Predictive Control for Nonstationary Soda Ash Carbonation: Comparative Performance and a Practical Implementation Framework / Proceedings of the 8th International Scientific Conference. Marseille, France. 2026 – pp.8-14. – DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.22799134

5. Yusupbekov N.R., Muxitdinov D.P., Isxakova F.F. Matematik modeldan foydalanib kalsinatsiyalangan soda ishlab chiqarishda karbonizatsiyalash kolonnasi parametrlarini optimallashtirish uchun dasturiy ta'minot / O'zbekiston respublikasi adliya vazirligi. DGU 51277 – 22.05.2025 y.

6. Yusupbekov N.R., Muxitdinov D.P., Isxakova F.F. Soda ishlab chiqarishdagi karbonizatsiyalash kolonnasi MPC asosida boshqarish uchun dasturiy ta'minot / O'zbekiston respublikasi adliya vazirligi. DGU 62282 – 15.05.2026 y.

Avtoreferat «Kimyo va kimyo texnologiyasi» ilmiy-texnikaviy 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» garniturasi.
Raqamli bosma usulda bosildi.
Shartli bosma tabog‘i: 2,75. Adadi 100 dona. Buyurtma № 37/26.

Guvohnoma № 851684.
«Tipograff» MCHJ bosmaxonasida chop etilgan.
Bosmaxona manzili: 100011, Toshkent sh., Alisher Navoiy ko‘chasi, 36 uy.
Tel: +99894-600-44-07