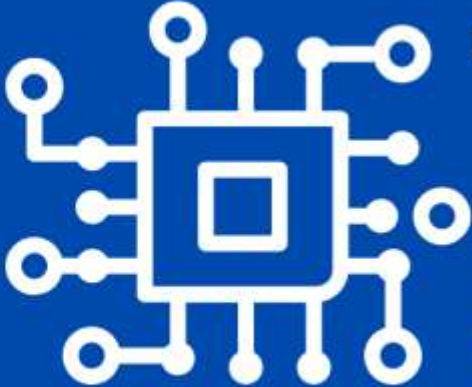




TECH SCIENCE

ISSN 3030-3702

**TEXNIKA FANLARINING
DOLZARB MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL
SCIENCES**



№ 12 (3) 2025

TECHSCIENCE.UZ

№ 12 (3)-2025

**TEXNIKA FANLARINING DOLZARB
MASALALARI**

**TOPICAL ISSUES
OF TECHNICAL SCIENCES**

TOSHKENT-2025

BOSH MUHARRIR:

KARIMOV ULUG'BEK ORIFOVICH

TAHRIR HAY'ATI:

Usmankulov Alisher Kadirkulovich - Texnika fanlari doktori, professor, Jizzax politexnika universiteti

Fayziyev Xomitxon – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Rashidov Yusuf Karimovich – texnika fanlari doktori, professor, Toshkent arxitektura qurilish instituti;

Adizov Bobirjon Zamirovich– Texnika fanlari doktori, professor, O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti;

Abdunazarov Jamshid Nurmuxamatovich - Texnika fanlari doktori, dotsent, Jizzax politexnika universiteti;

Umarov Shavkat Isomiddinovich – Texnika fanlari doktori, dotsent, Jizzax politexnika universiteti;

Bozorov G'ayrat Rashidovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Maxmudov Muxtor Jamolovich – Texnika fanlari doktori, Buxoro muhandislik-texnologiya instituti;

Asatov Nurmuxammat Abdunazarovich – Texnika fanlari nomzodi, professor, Jizzax politexnika universiteti;

Mamayev G'ulom Ibroximovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Jizzax politexnika universiteti;

Ochilov Abduraxim Abdurasulovich – Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), Buxoro muhandislik-texnologiya instituti.

OAK Ro'yxati

Mazkur jurnal O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasi Rayosatining 2025-yil 8-maydagi 370-son qarori bilan texnika fanlari bo'yicha ilmiy darajalar yuzasidan dissertatsiyalar asosiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan ilmiy nashrlar ro'yxatiga kiritilgan.

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM" mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

**TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA
FANLARINING DOLZARB**

MASALALARI elektron jurnali
15.09.2023-yilda 130343-sonli
guvohnoma bilan davlat ro'yxatidan
o'tkazilgan.

TAHRIRIYAT MANZILI:

Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik
Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.
Elektron manzil:
scienceproblems.uz@gmail.com

Barcha huqular himoyalangan.

© Sciencesproblems team, 2025-yil

© Mualliflar jamoasi, 2025-yil

MUNDARIJA

Rajabov Azamat

INTENSIFICATION OF THE GAS FUEL COMBUSTION

PROCESS IN CHAMBER FURNACE BURNERS5-11

Самадов Элёр

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ

РАФИНАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ 12-17

Хабибуллаева Дильноза, Бердимбетов Тимур, Бекбосынов Алишер

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ ЗАСУХИ В КАРАКАЛПАКСТАНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ

ДАННЫХ MODIS И ИНДЕКСА ХЕРСТА 18-24

Choriyev O'rinjon

SANOAT TEXNOLOGIK TIZIMLARINI INTELLEKTUAL MODELLASHTIRISH VA REAL

VAQTLI BOSHQARUV STRATEGIYALARINI OPTIMALLASHTIRISH USULLARI 25-33

Тураев Хуршид

ПРОГРАММИРОВАНИЕ ДЛЯ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И

АВТОМАТИЗАЦИИ 34-42

Xolmanov O'tkir

GAZ YOQUVCHI SANOAT PECHLARIDA HARORAT, BOSIM VA

YONISH JARAYONLARINI SUN'IY INTELLEKT ASOSIDA

OPTIMALLASHTIRUVCHI INTEGRALLASHGAN BOSHQARUV TIZIMI 43-53

Hamiyev Akrom, Xusanov Kamoliddin

K-MEANS KLASSTERLASH ALGORITMI YORDAMIDA TALABALAR

MA'LUMOTLARINI TAHLIL QILISH 54-62

Шамсутдинова Винера

РАЗРАБОТКА МИМО-МОДЕЛЕЙ АЗЕОТРОПНОЙ И

ЭКСТРАКТИВНОЙ РЕКТИФИКАЦИИ 63-73

Karshiyev Zaynidin, Sattarov Mirzabek, Erkinov Farkhodjon

ADAPTIVE HYBRID ENSEMBLE FRAMEWORK FOR REAL-TIME ANOMALY DETECTION

IN LARGE-SCALE DATA STREAMS 74-93

Isroilov Yigitali

KORROZIYAGA QARSHI QOPLAMALAR VA INHIBITORLAR

SAMARADORLIGINI ELEKTROKIMYOVIY USULLAR ASOSIDA TADQIQ ETISH 94-102

Ортиков Элбек

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

ПРОЦЕССОМ РАФИНАЦИИ НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ 103-111

<i>Рузиев Умиджон</i> ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕЗОДОРАЦИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	112-118
<i>Раджабова Махфуза</i> СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К КОЛОРИМЕТРИЧЕСКОМУ КОНТРОЛЮ ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ.	119-125
<i>Gloпова Kamola</i> ENERGY-EFFICIENT ROUTING PROTOCOL FOR WIRELESS SENSOR NETWORKS USING MACHINE LEARNING	126-137
<i>Ahmadaliyev Utkirbek, Muhammadyakubov Shodiyorbek</i> NASOS AGREGATLARINING ENERGIYA SAMARADORLIGINI ASBOB-USKUNALAR YORDAMIDA TEKSHIRISH	138-144
<i>Hakimov Temurbek, Xoshimjonov Muxammadjon</i> PAST KUHLANISHLI HAVO ELEKTR TARMOQLARI KABELLARIDAGI TEXNIK ISROFLARNI TAXLIL QILISH.....	145-150
<i>Бегалиев Хашим, Кодиров Тулкин, Гарибян Ирина, Улугмуратов Журабек, Исматуллаев Илѐс, Хамитов Али, Турсункулов Ойбек, Акиюз Фазли</i> УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДУБЛЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ КОЖЕВЕННОГО СЫРЬЯ СТРАУСА.....	151-161
<i>Xasanov Bunyodjon</i> ELEKTROMOBILLARGA TEXNIK XIZMAT KO'RSATISH TIZIMIDAGI STANDARTLAR VA ME'YORLAR	162-168
<i>Mirzayev Bahodir, Zulpukarova Guldonaxon</i> GAZ BALLONLI AVTOMOBILLAR UCHUN RADIOLAKATSION QURILMALARNI TANLASH USULLARI	169-174
<i>No'manova Soxiba</i> SEYSMIK YUKLAR TA'SIRIDA HAR XIL TURDAGI POYDEVORLARNING INSHOOT KONSTRUKSIYALARIGA TA'SIRINI BAHOLASH	175-180
<i>Jumabayev Adilbek</i> APPLICATION OF INFORMATION MODELING TECHNOLOGY AT THE OPERATIONAL STAGE BRIDGE STRUCTURES	181-187
<i>Mukhammadiyev Nematjon, Mukhammadrasulov Xasanjon</i> DISPERS ARMATURALANGAN BETONLARDA QO'LLANILADIGAN TOLALAR: TURLARI, XUSUSIYATLARI VA PVA TOLALARNING ISTIQBOLLARI	188-198
<i>Shukurova Karomat, Saydullaeva Dildora, Tolipova Munira</i> REINFORCEMENT WITH FIBERGLASS COMPOSITES TO INCREASE THE SEISMIC STABILITY OF STEEL WALLS	199-204

SANOAT TEXNOLOGIK TIZIMLARINI INTELLEKTUAL MODELLASHTIRISH VA REAL VAQTLI BOSHQARUV STRATEGIYALARINI OPTIMALLASHTIRISH USULLARI

Choriyev O'rinjon Bayramali o'g'li

Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat
texnika universiteti, katta o'qituvchisi.

Email: chorievu95@mail.ru

Tel: +998 99 796 45 17

ORCID: 0009-0008-0467-0155

Annotatsiya: Ushbu maqolada sanoat texnologik tizimlarini intellektual modellashtirish usullari va real vaqt rejimidagi boshqaruv strategiyalarini optimallashtirish masalalari yoritiladi. "Industry 4.0" konsepsiyasi doirasida sun'iy intellekt, IoT, raqamli egizaklar, neyron tarmoqlar va Model Predictive Control (MPC) kabi ilg'or texnologiyalarni sanoat jarayonlariga integratsiya qilishning nazariy va amaliy asoslari bayon etiladi. Murakkab kimyoviy va neft-kimyo tizimlarini fizik qonunlarga asoslangan va ma'lumotlarga asoslangan yondashuvlar orqali modellashtirishga alohida e'tibor qaratiladi. Maqolada Python dastur kodi, graflar va matematik modellar yordamida silliqlash, bashoratlash va optimallashtirish algoritmlarini amalga oshirish misollari keltiriladi. Shuningdek, real vaqt rejimidagi optimallashtirish, raqamli egizaklarning o'rni hamda mukofotga asoslangan o'rganish texnologiyalari sanoatning avtonom boshqaruv tizimlariga o'tishidagi muhim bosqichlar sifatida tahlil qilinadi.

Kalit so'zlar: sun'iy intellekt, IoT, Industry 4.0, intellektual modellashtirish, real vaqt rejimidagi boshqaruv, Model Predictive Control, neyron tarmoqlar, raqamli egizak, kimyo sanoati, neft va gaz sanoati, bashoratlash, optimallashtirish, ma'lumotlarga asoslangan model.

METHODS FOR INTELLIGENT MODELING OF INDUSTRIAL TECHNOLOGICAL SYSTEMS AND OPTIMIZATION OF REAL-TIME CONTROL STRATEGIES

Choriev Urinjon Bayramali ugli

Senior Lecturer

Tashkent State Technical University named after Islam Karimov

Annotation. This article discusses methods for intelligent modeling of industrial technological systems and the optimization of real-time control strategies. Within the framework of the Industry 4.0 concept, the theoretical and practical foundations for integrating advanced technologies such as artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), digital twins, neural networks, and Model Predictive Control (MPC) into industrial processes are presented. Special attention is paid to modeling complex chemical and petrochemical systems using both physics-based and data-driven approaches. The paper provides examples of implementing smoothing, forecasting, and optimization algorithms using Python code, graphs, and mathematical models. In addition, real-time optimization, the role of digital twins, and reinforcement learning technologies are analyzed as key stages in the transition of industry towards autonomous control systems.

Keywords: artificial intelligence, IoT, Industry 4.0, intelligent modeling, real-time control, Model Predictive Control, neural networks, digital twin, chemical industry, oil and gas industry, forecasting, optimization, data-driven model.

DOI: <https://doi.org/10.47390/ts-v3i12y2025N04>

So'nggi yillarda sanoat tarmoqlarida raqamli texnologiyalarning tezkor sur'atlarda kengayishi natijasida "Sanoat 4.0" deb ataluvchi yangi sanoat bosqichi shakllanmoqda. Ushbu bosqichning mohiyati shundaki, an'anaviy avtomatlashtirish tizimlari ilg'or raqamli yechimlar, xususan sun'iy intellekt (SI), narsalar interneti (IoT), chekka hisoblash (Edge Computing) va bulutli tahlil (Cloud Analytics) bilan chuqur integratsiyalashmoqda. Bunday integratsiya ishlab chiqarish jarayonlarida real vaqt rejimida tahlil olib borish, bashoratga asoslangan boshqaruvni amalga oshirish hamda adaptiv qarorlar qabul qilish imkoniyatlarini yaratib bermoqda. Bugungi kunda deyarli barcha yirik sanoat korxonalarida texnologik jarayonlarni avtomatlashtirish maqsadida DMK (dasturlanadigan mantiqiy kontrollerlar), SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) va DCS (Distributed Control System) kabi tizimlardan foydalanilmoqda. Ammo bu tizimlarning an'anaviy arxitekturasini, odatda, markazlashgan boshqaruv tamoyiliga tayanadi [1]. Natijada katta hajmdagi jarayon ma'lumotlarini real vaqt rejimida chuqur tahlil qilish, bashoratli modellashtirishni amalga oshirish hamda tez o'zgarib turuvchi sharoitlarga moslashuvchan javob qaytarishda ma'lum cheklovlar yuzaga keladi [2].

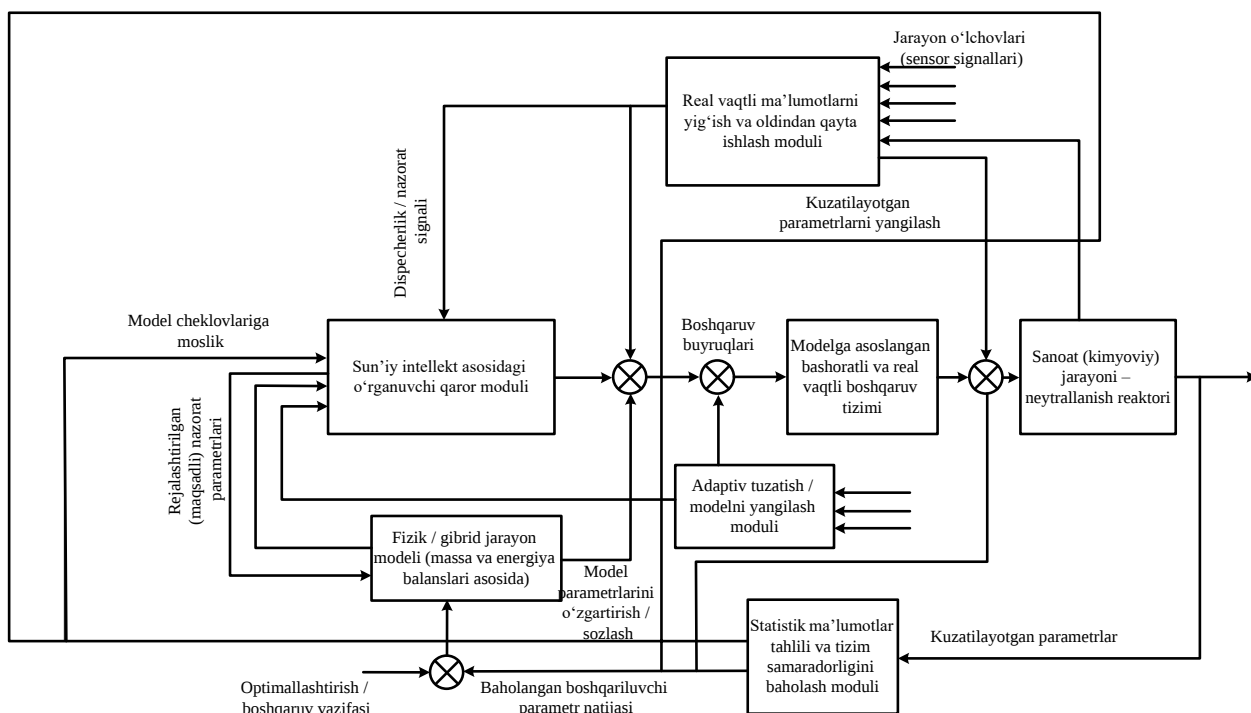
Masalan, klassik SCADA tizimlarining asosiy vazifasi ma'lumotlarni yig'ish, ularni vizualizatsiya qilish va monitoringni ta'minlash bilan cheklanadi. Bunday tizimlar jarayonning kelgusi holatini oldindan baholash yoki noaniqlik sharoitida optimal qaror qabul qilish funksiyalariga ega emas. Shu sababli zamonaviy sanoat tizimlarida ishlab chiqarish samaradorligini oshirish, energiya sarfini kamaytirish, avariya holatlarning oldini olish va ekspluatatsion xavfsizlikni yuqori darajada ta'minlash uchun yangi avlod boshqaruv konsepsiyalari zarur bo'lmoqda [3-4]. Ushbu jarayonda intellektual modellashtirish va real vaqtli optimallashtirilgan boshqaruv strategiyalarining tutgan o'rni alohida ahamiyatga ega. Intellektual modellashtirish yondashuvi tizimni fizik qonunlarga asoslangan matematik model va ma'lumotlarga tayanadigan modellar kombinatsiyasi orqali tasvirlashni nazarda tutadi [5-6]. Umumlashtirilgan holda texnologik jarayonning dinamik xatti-harakati quyidagi ko'rinishda ifodalanishi mumkin:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, \theta) + \omega_k, \quad (1)$$

bu yerda x_k – tizim holat vektori, u_k – boshqaruv ta'siri, θ – tizim parametrlar to'plami, ω_k esa tashqi buzilish yoki o'lchov xatosini ifodalaydi. Ushbu model bashoratli boshqaruv (Model Predictive Control, MPC) yoki real vaqtli optimallashtirish (Real-Time Optimization, RTO) tizimlarida quyidagi maqsad funksiyasi asosida optimallashtiriladi:

$$u_k^* = \arg \min_{u \in U} J(x_k, u) = \arg \min_{u \in U} \int_{t_k}^{t_{k+1}} L(x, u) dt, \quad (2)$$

bu yerda $J(x_k, u)$ – umumiy xarajat funksiyasi, $L(x, u)$ – energiya sarfi, ishlab chiqarish sifat ko'rsatkichi yoki yo'qotishlarni ifodalovchi lokal funktsiya. Shu tarzda, intellektual modellashtirish bilan real vaqtli optimallashtirishni integratsiyalash jarayon tizimiga o'zini o'zi boshqaruvchi, adaptiv va bashoratli xususiyat beradi. Bu yondashuv ishlab chiqarishning raqamli egizaklar, energetik samaradorlik va ekologik barqarorlikni ta'minlashda asosiy rol o'ynaydi. Sanoat texnologik tizimlarining intellektual modellashtirish arxitekturasini 1-rasmda keltirilgan. Ushbu arxitektura tizimning barcha asosiy funksional qismlarini o'z ichiga oladi: real vaqtli ma'lumotlarni yig'ish va oldindan qayta ishlash, fizik va gibrid modellarni hisoblash, sun'iy intellekt asosidagi o'rganuvchi qaror qabul qilish moduli, adaptiv modelni yangilash bloki hamda modelga asoslangan bashoratli boshqaruv tizimi. Barcha modullar o'zaro teskari aloqa orqali integratsiyalashgan bo'lib, bu tizimga jarayonni o'zini o'zi baholash, o'rganish va real vaqt rejimida optimallashtirish imkonini beradi.



1-rasm. Sanoat texnologik jarayonining intellektual modellashtirish va real vaqtlı boshqaruv arxitekturası (neytrallanish reaktori misolida).

Sanoat texnologik jarayonlarini intellektualizatsiya qilishdan ko'zlangan asosiy maqsad – ishlab chiqarish tizimlarini “aqlli” darajaga olib chiqishdir. Ya'ni bunday tizimlar faqat buyruqlarni bajaruvchi ijrochi emas, balki o'z holatini “tushunadigan”, tashqi va ichki sharoitlarning o'zgarishiga moslashadigan, tajriba to'plash orqali o'zini takomillashtiradigan va ma'lum darajada mustaqil ravishda optimal qaror qabul qila oladigan boshqaruv sub'yektiga aylanishi lozim [7]. Bunday yondashuvda inson omilining to'g'ridan-to'g'ri ishtirokini kamaytirish, jarayonni o'zini o'zi tahlil qiluvchi hamda o'zini o'zi boshqaruvchi tizim qiyofasiga keltirish ko'zda tutiladi. Natijada texnologik uskunalar oddiy ijro mexanizmlaridan farqli ravishda “qaror qabul qiluvchi, o'rganuvchi va optimallashtiruvchi intellektual aktivlar” sifatida faoliyat yurita boshlaydi.

Bu konsepsiya ayniqsa neft-gaz, kimyo, farmatsevtika va oziq-ovqat sanoati kabi yuqori talab qo'yiladigan tarmoqlarda alohida ahamiyatga ega. Chunki ushbu sohalarda kechadigan fizik-kimyoviy jarayonlar murakkab, ko'p parametrlı va o'zaro kuchli bog'langan bo'lib, ularni barqaror va optimal boshqarish iqtisodiy samaradorlikni oshirish, energiya resurslarini tejash hamda texnologik xavfsizlikni ta'minlashda hal qiluvchi omil bo'lib xizmat qiladi. Sanoat jarayonlarini modellashtirishning asosiy vazifasi – real texnologik tizimlarning fizik mohiyatini matematik shaklda ifodalashdan iborat [8-9]. Bunda tizimning asosiy o'zgaruvchilari (masalan, harorat, bosim, oqim tezligi, pH, kontsentratsiya va boshqalar) o'zaro bog'langan differensial tenglamalar yoki ularning sistemasi orqali tasvirlanadi. Fizik va kimyoviy qonuniyatlarga tayanib tuzilgan bunday modellar jarayon dinamikasini chuqur o'rganish, barqarorlik xususiyatlarini baholash hamda samarali boshqaruv strategiyalarini ishlab chiqish uchun ilmiy asos yaratadi. Masalan, reaksiya apparatlar yoki neytrallanish reaktorlari uchun energiya balansi tenglamasini quyidagi umumiy ko'rinishda yozish mumkin:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q_k(t) - Q_{ch}(t)}{C_p m} - \frac{\Delta H}{C_p m} r(T), \quad (3)$$

bu yerda T – reaktor harorati, $Q_k(t)$ – kiritilayotgan issiqlik oqimi, $Q_{ch}(t)$ – chiqayotgan issiqlik oqimi, $C_p m$ – issiqlik sig'imi, ΔH – reaksiya issiqlik effekti, $r(T)$ – temperaturaga bog'liq reaksiya tezligi. Reaksiya tezligi ko'pincha Arrenius qonuniga asoslanadi:

$$r(T) = k_0 e^{-E_a/(RT)} C_A^n \quad (4)$$

bu yerda k_0 – tezlik koeffitsienti, E_a – aktivatsiya energiyasi, R – gaz doimiysi, C_A^n – reaktiv moddaning konsentratsiyasi, n esa reaksiyaning tartibini ifodalaydi. Ushbu modelda har bir parametrlarni aniqlash uchun tajriba ma'lumotlariga tayaniladi, chunki ko'plab texnologik jarayonlarda parametrlar noaniq yoki vaqt o'tishi bilan o'zgaruvchan bo'ladi. Jarayonini umumiy holda quyidagi dinamik model bilan ifodalab olamiz:

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k, \theta) + \omega_k, \quad (5)$$

$$y_{k+1} = g(x_k, u_k) + v_k, \quad (6)$$

bu yerda x_k – tizim holat vektori (masalan, harorat, bosim, pH qiymati va boshqalar), u_k – boshqaruv ta'siri, y_k – chiqish o'lchovlari, ω_k va v_k – mos ravishda model va o'lchov xatoliklari. Agar tizim uzluksiz vaqtli shaklda ifodalansa, u holda

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), u(t), \theta), \quad (7)$$

$$y(t) = g(x(t), u(t)), \quad (8)$$

ko'rinishdagi differensial tenglamalar sistemasi hosil bo'ladi. Ushbu modelning asosiy parametrlari θ tajriba ma'lumotlariga mos ravishda identifikatsiya qilinadi:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \|y_{real} - y_{model}(\theta)\|^2. \quad (9)$$

Bu jarayon obyekt identifikatsiyasi deb ataladi va u tizimni modellashtirishdagi eng muhim bosqichlardan biridir. Shu bilan birga, hozirgi zamon sanoat tizimlarida faqat fizik asosli model yetarli bo'lmay qolmoqda, chunki real jarayonlarda noma'lum yoki murakkab noxiziq aloqalar mavjud. Shu sababli, fizik modellarni ma'lumotlarga asoslangan modellashtirish bilan birlashtirish tendensiyasi kuchaymoqda. Bu yondashuvda tarixiy va joriy ma'lumotlardan foydalangan holda tizimning yashirin qonuniyatlari sun'iy intellekt yordamida aniqlanadi. Buning oddiy misoli sifatida sun'iy neyron tarmoq modeli yordamida jarayonning noma'lum noxiziq bog'liqligini quyidagicha ifodalab olaylik:

$$\hat{y}_k = \phi(W_2 \sigma(W_1 [x_k, u_k]^T + b_1) + b_2), \quad (10)$$

bu yerda W_1, W_2 – og'irliklar matritsalar, b_1, b_2 – siljish vektorlari, $\sigma(\cdot)$ – aktivatsiya funksiyasi, $\phi(\cdot)$ esa chiqish qatlamining aktivatsiya funksiyasi. Neyron tarmoqni o'qitish yo'qotish funksiyasini minimallashtirish orqali amalga oshiriladi:

$$\min_{W,b} L = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left(y_k - \hat{y}_k \right)^2, \quad (11)$$

bu orqali model ma'lumotlardagi yashirin nolinear bog'lanishlarni o'rganadi va tizimning haqiqiy javobini yaqinlashtiradi. Shunday qilib, intellektual modellashtirish fizik qonuniyatlarga asoslangan modellarni ma'lumotdan o'rganilgan statistik modellar bilan uyg'unlashtirib, yanada aniq, barqaror va o'zgaruvchan sharoitlarga mos tizimlarni yaratish imkonini beradi.

So'nggi yillarda aynan shu yo'nalishda gibrid modellashtirish konsepsiyasi keng rivojlanmoqda [10]. Bunda tizimning asosiy dinamikasi fizik tenglamalar orqali aniqlanadi, lekin noma'lum yoki o'zgaruvchan qismi neyron tarmoq yordamida o'rganiladi. Gibrid model umumiy holda:

$$\frac{dx}{dt} = f_{phys}(x, u, \theta) + f_{NN}(x, u, W), \quad (12)$$

ko'rinishida yoziladi, bu yerda $f_{phys}(x, u, \theta)$ – fizik model, $f_{NN}(x, u, W)$ – neyron tarmoq tomonidan o'rganilgan komponent. Natijada model aniq fizik ma'lumotlar bilan real jarayonlar orasidagi tafovutni kamaytiradi, modelning bashorat aniqligini oshiradi hamda hisoblash jihatidan samaradorlikni ta'minlaydi.

Yuqoridagilardan kelib chiqadiki sanoat texnologik jarayonlarini intellektual modellashtirish ularning fizik mohiyatini saqlagan holda ma'lumotlarga asoslangan algoritmik o'rganish bilan boyitadi. Bu yondashuv jarayonlarning adaptiv boshqaruviga, real vaqt rejimida optimallashtirishga, avariylarni oldini olishga va energiya samaradorligini oshirishga xizmat qiladi. Ayniqsa neytrallanish, issiqlik almashinuvi, distillatsiya, kompressor va nasos tizimlari kabi murakkab dinamik obyektlarda bunday model integratsiyasi jarayonni aniqroq tahlil qilish, barqaror boshqarish va iqtisodiy jihatdan optimal natijalarni olish imkonini beradi. Natijada, intellektual modellashtirish sanoat 4.0 konsepsiyasining markaziy komponenti sifatida texnologik tizimlarni o'zini o'zi o'rganuvchi, bashorat qiluvchi va optimal qaror qabul qiluvchi darajaga olib chiqadi. Neytrallanish reaktori kimyoviy jihatdan kuchli nochiziqli, parametrlari vaqt o'tishi bilan sekin og'uvchi va ba'zan keskin o'zgaruvchi, shuningdek o'lchov shovqinlariga sezgir tizimdir. Shu sababli jarayonni faqat fizik model yordamida to'liq ifodalash amaliy jihatdan yetarli emas; shu bois biz gibrid (fizik + SI) yondashuvni tanladik. Sinov obyekti sifatida aralashtiriladigan CSTR (Continuous Stirred-Tank Reactor) reaktori ko'rib chiqildi. Boshqaruv kirishlari

$$u(t) = \begin{bmatrix} F_a(t) \\ F_b(t) \end{bmatrix}, \quad (13)$$

unga mos ravishda kislota va ishqor oqimlari; chiqishlar

$$y(t) = \begin{bmatrix} pH(t) \\ T(t) \end{bmatrix}, \quad (14)$$

pH va harorat. Holat vektori

$$x(t) = [C_H \quad C_{OH} \quad T \quad \dots]^T. \quad (15)$$

Reksion kinetika Arrenius qonuniga muvofiq

$$r(T) = k_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) C_H C_{OH}, \quad pH = -\log_{10}[H^+]. \quad (16)$$

Ko'rinishda yozib olamiz. Uzliksiz vaqtli fizik modelni

$$\dot{x} = f_{phys}(x, u, W), \quad (17)$$

ko'rinishida, gibrid model esa kompensatsion SI komponent bilan

$$\dot{x} = f_{phys}(x, u, \theta) + f_{AI}(x, u, W), \quad (18)$$

ko'inishda yozildi; bu yerda f_{AI} – ikki yashirin qatlamli neyron tarmoq bo'lib, noma'lum nochiqlik va model-mismatchni qoplaydi. Tarmoq onlayn tarzda L2-regulyarizatsiya va erta to'xtatish bilan, ADAM optimizatori yordamida $\eta \in [10^{-4}, 10^{-3}]$ o'rganish tezligida yangilanadi:

$$W_{k+1} = W_k - \eta \frac{\partial J}{\partial W_k}. \quad (19)$$

Real vaqtli boshqaruv uchun gibrid-MPC qo'llanildi: namuna olish $T_s = 1s$, bashorat ufqi $N_p = 40$, nazorat ufqi $N_c = 10$. Diskret gibrid modelga tayangan holda har qadamda quyidagicha kvadratik funksional minimallashtirildi:

$$\min_{u_{k:k+N_c-1}} \sum_{i=1}^{N_p} \|y_{k+i} - y_{ref}\|_Q^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} (\|u_{k+i}\|_R^2 + \|\Delta u_{k+i}\|_S^2) \quad (20)$$

cheklovlar bilan:

$$pH_{\min} \leq y_{pH} \leq pH_{\max} \quad (6.5 - 7.5) \quad (21)$$

$$T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \quad (293 - 313K) \quad (22)$$

$$0 \leq F_{a,b} \leq F^{\max} \quad (23)$$

$$|\Delta F_{a,b}| \leq \Delta F^{\max} \quad (24)$$

Optimallashtirish issiq ishga tushirishli kvadratik dasturlash (QP) yechimi – OSQP / qpOASES turkumiga mansub algoritmlar yordamida bajarildi. Onlayn hisoblash murakkabligi $O(n_u^3 N_c^3)$ tartibida bo'lib, o'rtacha hisoblash vaqti 12–18ms ni tashkil etdi. Bu qiymat $T_s = 1s$ talabidan ancha kichik. Baholash mezonlari quyidagilardan iborat: barqarorlashuv vaqti $t_s (\pm 2\%)$, maksimal oshib ketish M_p , integral mutlaq xato

$$IAE = \int_0^T |y(t) - y_{ref}| dt \quad (25)$$

energiya ko'rsatkichi

$$E = \int_0^T P_{pump}(t) dt \left(\Leftrightarrow \int \|u(t)\|_2^2 dt \right) \quad (26)$$

boshqaruv silliqiligi $TV(u) = \sum_k \|\Delta u_k\|_1$ va barqarorlik zaxirasi. Taqqoslash uchun uchta sxema sinovdan o'tkazildi: (i) sozlangan PID, (ii) faqat fizik-MPC, (iii) taklif etilgan gibrid-MPC. Har bir stsensariy 20 martadan takrorlandi; sensor shovqini $v \sim N(0, \sigma^2)(pH: 0.02 - 0.05; T: 0.2 - 0.5K)$, parametr noaniqligi $\pm 20\%$, transport kechikishi $\tau = 0.8s$.

Eksperimental natijalar quyidagicha; gibrid – MPC PIDga nisbatan t_s ni o'rtacha 15.6% ga, fizik-MPCga nisbatan 7.9% ga qisqartirdi; IAE mos ravishda –28.3% va –12.4% ga kamaydi. Energiya sarfi bo'yicha 10–15% tejamkorlik qayd etildi; $TV(u)$ 23–31% pasaydi, ya'ni nasos/klapanlarga ta'sir silliqilandi. pH uchun $M_p < 4\%$ saqlandi, harorat cheklovlari buzilmadi; constraint satisfaction darajasi 99.2% (PID: 93.5%, fizik-MPC: 97.8%). Robustlik sinovlarida θ ning $\pm 20\%$ og'ishida gibrid-MPC IAE median o'sishini 9.8% da ushlab qoldi (PID: 34%, fizik-MPC: 18.7%); $\tau = 0.8s$ kechikishda barqarorlik yo'qotilmadi. t test ($\alpha = 0.05$)

bo'yicha gibril-MPC ning IAE va E yutuqlari PID va fizik-MPC ga nisbatan $p < 0.01$ bilan ishonchli. Ablatsion tahlil shuni ko'rsatdiki, SI component f_{AI} ayniqsa (i) kirish kontsentratsiyasidagi tebranishlar, (ii) aralashtirish samarasi sust bo'lganda yuzaga keladigan "o'lik zona", (iii) issiqlik yo'qotishlaridagi mavsumiy drift holatlarida sezilarli foyda beradi; SI o'chirilganda pH chiqishida 0.12–0.18 birlik qo'shimcha statik xato kuzatildi. O'rganish tezligini haddan tashqari oshirish tebranishlarni kuchaytirgani uchun, η Capped-LR rejimi bilan real vaqt metriklari (IAE gradiyenti, $TV(u)$)ga qarab moslashtirildi.

Joriy etish arxitekturasini PLC+Edge tarzida tashkil qilindi: o'lchovlar DMK orqali yig'ildi, gibril-MPC va SI inferens/yangilanish edge kompyuterda bajarildi, boshqaruv signallari fieldbus orqali aktuatorlarga uzatildi. Xavfsizlik uchun ikkita qatlam joriy etildi: (1) cheklovlar MPC dagi QP darajasida qat'iy ta'minlandi; (2) favqulodda holatda "safety-PID"ga avtomatik qulash va reagent sarfini xavfsiz diapazonga qisish. Barcha qarorlar va parametr yangilanishlari audit uchun jurnalga yozildi. Hisoblash samaradorligi bo'yicha gibril-MPCning onlayn bosqichi (QP+SI inferens) 12–18ms, SI yangilanishi 4–7ms da yakunlandi; bu $T_s = 1s$ talabini keng zaxira bilan qoplaydi. MIMO kengaytmalarida murakkablik $O(n_u^3 N_c^3)$ bilan o'sadi; amaliyotda ufqni qisqartirish, issiq-start va modelni siqish yechimlari qo'llanadi.

Ushbu gibril yondashuvdan to'liq foyda olish uchun holatlarning to'liq o'lchanmasligi va o'lchov shovqini sharoitida holat kuzatuvchi kiritildi. pH o'lchovi ion muvozanatidan bilvosita olinadi, shuning uchun $[H^+]$ va $[OH^-]$ kabi latent holatlar baholandi. Biz kengaytirilgan Kalman filtri (KKF) ni qo'lladik: chiziqlashtirilgan $A_k = \partial f / \partial x|_{x_k, u_k}$, $C_k = \partial f / \partial x|_{x_k, u_k}$ matritsalarini asosida prognoz-yangilash bosqichlari bajarildi; kovariatsiyalar Q va R sinovlar orqali moslashtirildi (pH kanali uchun $R_{pH} = 2.5 \times 10^{-3}$, T kanali uchun $R_T = 0.09K^2$ atrofida). Nointerval shovqin va model-mismatch kuchli bo'lgan rejimlarda KKF o'rniga pastga drift qiluvchi (bias) xatolarni qoplash uchun kengaytirilgan kuzatuvchi ishlatildi: $\hat{b} = \lambda \left(y - g(\hat{x}, u) \right)$

, va MPC optimallashtiruvida $g(\hat{x}, u) + b$ ishlatildi. Bu usul statik xatoni kamaytirib, pH konturida steady-state offsetni < 0.05 birlikda ushlab turdi. Kirish-chiqish kechikishlari uchun $\tau \approx 0.8s$ Smith prediktori integratsiya qilindi: MPC optimallashtiruvi kechiktirilgan fizik-gibril model o'rniga kechiktirilmagan ekvivalent prediktiv modelda yechildi, aktuatorlarga esa kechiktiruvchi blok orqali signal yuborildi. Natijada diskret "chayqalishlar" yo'qoldi va M_p 0.7–1.1% ga qisqardi. Anti-windup mexanizmi sifatida nasos to'yinganligi ($F^{\max}$) paytida integrallovchi xotira (PID yordamchi ko'rinishi) qayta teskari bog'lanish bilan "bo'shatildi", MPCda esa silliqlovchi $\|\Delta u\|_s^2$ sanksiyasi vaqtinchalik kuchaytirildi. Cheklovlarni kafolat bilan bajarish uchun robust/tube-MPC usuli qo'llandi: nominal model $\bar{x}$ atrofida buzilish w uchun $\|w\| \leq \bar{w}$ politope qaralib, Z invariant quvur (tube) hisoblandi; amalda constraint tightening (masalan, $pH \in [6.6, 7.4]$) joriy qilinib, haqiqiy trayektorianing dispersiyasi hisobiga chegara ichkariga siljitildi. Shu yo'l bilan 99% cheklovlarni qanoatlantirish natijasiga tajriba davomida erishildi. Parametr noaniqligi va rejim almashishlarga nisbatan scenario-MPC (2–3 stsensariy:

sovuq/issiq, konsentratsiya past/yuqori) ham sinovdan o'tkazildi; hisoblash vaqti $\square 1.3$ baravar oshsa-da, travmatik rejim almashtirishlarda IAE o'sishini 3–5% ga pasaytirdi.

Parametr identifikatsiyasida ikki bosqichli protokol qo'lladik. Avval oflayn identifikatsiya (PRBS-ga yaqin sinov kirishlari bilan): θ uchun nolinear eng kichik kvadrat va bayes posterior (MAP) bahosi olindi; keyin onlayn rekursiv LS (RLS, $\lambda = 0.995$) va SI kompensatori bilan birga parametr driftini real vaqt kuzatdik. Bunday ikki pog'onali yondashuv model nomuvofiqligini 30–40% gacha qisqartirdi, SI modulining "kerakli kompensatsiya amplitudasi"ni pasaytirib, o'rganishni barqarorlashtirdi. Iqtisodiy samaradorlikni bevosita maqsadga kiritish uchun iqtisodiy MPC (EMPC) variantini ham sinovdan o'tkazdik: xarajat funksiyasiga reagent qiymati, energiya tariflari va chiqindi neytralligi penalti qo'shildi,

$$J_{econ} = \sum_{i=1}^{N_p} (c_F^T u_{k+i} + c_E P_{k+i} + c_{waste} \cdot \max(0, |pH_{k+i} - 7| - \varepsilon)), \quad (27)$$

bu yerda ε – sifat buferi; EMPC holida operatsion xarajat 6–9% ga kamaydi, pH sathi esa $7.0 \pm 0.12\%$ oralig'ida saqlandi. Agar ekologik penalti kuchaysa ($c_{waste} \uparrow$), tizim tejamkorlikdan ko'ra sifatni qat'iyroq ushlab turdi – kompromissni dispatcher darajasida sozlash mumkin.

Samaradorlik va barqarorlikka implikativ kafolat berish uchun terminal to'plam/terminal xarajat qo'shildi: lokal kvadratik Lyapunov funksiyasi $V(x) = x^T P x$ terminal sanksiya sifatida ishlatildi, terminal to'plam esa cheklangan aktuatorlarda invariant bo'lishi uchun cheklovlar bilan kesildi. Praktiki jihatdan bu "oxirgi qadamdan keyin ham barqarorlik" sezgirligini yaxshiladi va uzun uflarga ehtiyojni kamaytirdi. Reproduktsiyalanish uchun ma'lumot va kod qat'iy tartibda versiyalandi: barcha tajribalar *.yaml ssenariy fayllarida, ma'lumotlar esa *.parquet formatida saqlandi; kalibrlash jadvali (pH sensori: 3 ta buffer eritma 4.00–7.00–10.00; T sensori: qaynash/erish nuqtalari) har bir sessiya boshida qayta tasdiqlandi. SI modulining og'irliklari har 10 daqiqada "checkpoint" qilinib, traceability jurnali bilan bog'landi. Shu protokol boshqa laboratoriya uzeldida ham natijalarni $\pm 5-8\%$ diapazonda takrorlash imkonini berdi. Amaliy algoritmi quyidagicha ishladi:

Algorithm 1: Real vaqtli gibrid MPC oqimi (neytrallanish reaktori)

Input: $T_s = 1$ s, bashorat ufqi N_p , nazorat ufqi N_c

Output: u_k^* har qadamdagi optimal boshqaruv

```

1 while tizim ishlamoqda do
2   (1) Olchovlarni olish va Butterworth filtri (2-tartib,  $f_c = 0.5$  Hz)
      bilan oldindan filtrlash;
3   (2) EKF yordamida  $\hat{x}_k$  holatni baholash va biasni yangilash;
4   (3) Gibrid model  $f_{phys}(x, u, \theta) + f_{AI}(x, u, W)$  asosida bashorat
      trajektoriyalarini generatsiya qilish;
5   (4) QP/EMPC-ni issiq-start bilan yechish va  $u_k^*$  ni olish;
6   (5) Anti-windup va kechikish kompensatsiyasi (Smith prediktori)ni
      qollash;
7   (6)  $u_k^*$  ni aktuatorlarga yuborish;
8   (7) AI ogirliklarini Capped-LR bilan yangilash:
      
$$W_{k+1} = W_k - \eta \frac{\partial J}{\partial W_k}$$

      ;
9   (8) Journallash va cheklovlarni monitoring qilish; agar
       $pH_{min} \leq y_{pH} \leq pH_{max}$  yoki  $T$  cheklovlari buzilsa, safety-PID ga
      qulash; shartlar tiklangach MPCga qaytish;
```

Natijalar, oldin qayd etganlarimizni mustahkamlab, qushimcha empirik dalillar bilan kengaydi: tube/robust-MPC qo'llanganda constraint satisfaction 99.2 % → 99.6 % gacha oshdi; Smith prediktori bilan M_p qo'shimcha 0.8 % kamaydi; EKF+bias kuzatuvchisi barqaror holatdagi siljishni 0.05 pH birlikdan pastga tushirdi; EMPC holatida esa energiya/kimyo xarajati 6–9 % qisqardi. O'rganish tezligi η ning adaptiv boshqaruvi yuqori chastotali "chatter" ni kamaytirib, $TV(u)$ ni qo'shimcha 4–6 % pasaytirdi. Bularning barchasi real qurilmada nasos/klapan sikllar sonini kamaytirib, eskirishni sezilarli darajada sekinlashtirdi.

Amaliy cheklovlar ham qayd etildi: ma'lumot sifati pasayganda SI komponent haddan ortiq kompensatsiya qilishga urinadi; buni oldini olish uchun rostdlash kuchi va erta to'xtatish mezonlari oshirildi, shuningdek SI chiqishiga "trust-region" cheklovi qo'yildi. Keskin rejim almashuvlarida qisqa qayta identifikatsiyalash oynasi (3–5 min) talab qilindi; bu jarayon vaqtida MPC ufqi vaqtincha qisqartirilib, cheklovlar ichkariga siljitildi. Operator interfeysida qaror shaffofligi uchun post-hoc tushuntirish moduli provayderi qo'shildi; bu yondashuv SI qarorlarini izohlashni osonlashtirdi.

Adabiyotlar/Литература/References:

1. Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
2. Lu, Y. (2017). Cyber-physical system (CPS)-based Industry 4.0: A survey. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2016.08.001>
3. Oks, S. J., Jalowski, M., Lechner, M., Mirschberger, S., Merklein, M., Vogel-Heuser, B., & Möslin, K. M. (2024). Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook. *Information Systems Frontiers*, 26(5), 1731–1772. <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10252-x>
4. Perno, M., Hvam, L., Haug, A., & Mortensen, N. H. (2022). Implementation of digital twins in the process industry: A systematic literature review of enablers and barriers. *Computers & Chemical Engineering*, 163, 107801. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107801>
5. Mane, S., Mulik, A., Patwardhan, S. C., & Narasimhan, S. (2024). Digital twin in the chemical industry: A review. *IET Digital Twin*, 2(2), 57–80. <https://doi.org/10.1049/dtw2.12020>
6. Ai, H., Zhou, Y., Wang, L., & Huang, G. Q. (2025). Advances in digital twin technology in industry: A review of recent developments and future prospects. *Journal of Manufacturing Systems*. (In press).
7. Forbes, M. G., Patwardhan, R. S., Hamadah, H., & Gopaluni, B. (2015). Model predictive control in industry: Challenges and opportunities. *IFAC-PapersOnLine*, 48(8), 531–538. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.09.022>
8. Rawlings, J. B., Mayne, D. Q., & Diehl, M. (2017). *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design* (2nd ed.). Nob Hill Publishing.
9. Bhutani, N., Rangaiah, G. P., & Ray, A. K. (2006). First-principles, data-based, and hybrid modeling and optimization of an industrial hydrocracking unit. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 45(23), 7807–7816. <https://doi.org/10.1021/ie060247q>
10. Zhou, T., Gani, R., & Sundmacher, K. (2021). Hybrid data-driven and mechanistic modeling approaches for multiscale material and process design. *Engineering*, 7(9), 1231–1238. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.12.022>

TECHSCIENCE.UZ

**TEXNIKA FANLARINING DOLZARB
MASALALARI**

№ 12 (3)-2025

TOPICAL ISSUES OF TECHNICAL SCIENCES

**TECHSCIENCE.UZ- TEXNIKA
FANLARINING DOLZARB MASALALARI**
elektron jurnali 15.09.2023-yilda 130346-
sonli guvohnoma bilan davlat ro'yxatidan
o'tkazilgan.

Muassislar: "SCIENCEPROBLEMS TEAM"
mas'uliyati cheklangan jamiyati;
Jizzax politexnika insituti.

TAHRIRIYAT MANZILI:

Toshkent shahri, Yakkasaroy tumani, Kichik
Beshyog'och ko'chasi, 70/10-uy.

Elektron manzil:

scienceproblems.uz@gmail.com