



SUMQAYIT DÖVLƏT UNIVERSİTETİ
СУМГАИТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SUMGAYIT STATE UNIVERSITY

ELMI XƏBƏRLƏR

НАУЧНЫЕ ИЗВЕСТИЯ

SCIENTIFIC NEWS

ISSN 1680 - 1245 **Print**

ISSN 2706 - 719X **Online**

TƏBİƏT VƏ TEXNİKİ ELMLƏR BÖLMƏSİ

СЕРИЯ: ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

SERIES FOR NATURAL AND TECHNICAL SCIENCES

Cild
Tom
Volume **26 №1**



Sumqayıt

2026

ISSN 2706-719X (Online)
ISSN 1680-1245 (Print)



SUMQAYIT DÖVLƏT UNİVERSİTETİ
СУМГАИТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
SUMGAIT STATE UNIVERSITY

ELMİ XƏBƏRLƏR

НАУЧНЫЕ ИЗВЕСТИЯ

SCIENTIFIC NEWS

Təbiət və texniki elmlər bölməsi
Серия: Естественные и технические науки
Series for Natural and Technical Sciences

Cild 26

2026

№ 1

Sumqayıt – 2026

Sumqayıt Dövlət Universiteti
Elmi xəbərlər. Təbiət və texniki elmlər bölməsi
REDAKSİYA HEYƏTİ

Baş redaktor
Baş redaktorun müavini

Əminağa Sadıqov, AMEA-nın müxbir üzvü, rektor v.i.e.
Elşad Abdullayev, dosent, elm və innovasiyalar üzrə prorektor

REDAKSİYA HEYƏTİNİN ÜZVLƏRİ

Fizika
Riyaziyyat

Albert Qilmutdinov, akad. (Rusiya), Kamil Aydadada, AMEA-nın müxbir üzvü, prof. (Azərbaycan), Bilal Bilalov, AMEA-nın müxbir üzvü, prof. (Azərbaycan), Seong-Cho Yu, prof. (Cənubi Koreya), Süleyman Özçelik, prof. (Türkiyə), Kazimir Yanuşkeviç, prof. (Belarus), Kamil Sabitov, prof. (Rusiya), İman Əsgərzadə, prof. (Türkiyə), Şakir Nağıyev, prof. (Azərbaycan), Həmidulla Aslanov, prof. (Azərbaycan), Məmməd Yaqubov, prof. (Azərbaycan), Vaqif Salmanov, prof. (Azərbaycan), Rəşid Əliyev, r.e.d. (Azərbaycan), Tamella Əhmədova, dos. (Azərbaycan), Zəfər Hüseynov, dos. (Azərbaycan), Xalidə Həsənova, dos. (Azərbaycan), Samir Orucov, dos. (Azərbaycan), Gülnarə Quliyeva, dos. (məsul redaktor, Azərbaycan), Xəyal Seyfullayeva, dos. (Azərbaycan), Vüsalə Babacanova, dos. (Azərbaycan), Coşqun Bayramov, dos. (Azərbaycan), Sevil Lətifova, dos. (Azərbaycan)

Kimya elmləri

Ramil Baxtizin, akad. (Rusiya), Vaqif Abbasov, akad. (Azərbaycan), Dilqəm Tağıyev, akad. (Azərbaycan), Məhəmməd Babanlı, AMEA-nın müxbir üzvü, prof. (Azərbaycan), Tatyana Prosoçkina, prof. (Rusiya), Eldar Əhmədov, prof. (Azərbaycan), Muxtar Səmədov, prof. (Azərbaycan), Musa Mustafayev, dos. (məsul redaktor, Azərbaycan), Vəliyəddin Əhmədov, dos. (Azərbaycan), Mətləb Hətəmov, dos. (Azərbaycan)

Biologiya elmləri

Elşad Qurbanov, AMEA-nın müxbir üzvü, prof. (Azərbaycan), Pənah Muradov, AMEA-nın müxbir üzvü, prof. (Azərbaycan), Vladimir Prokofyev, prof. (Rusiya), Ulduz Həşimova, prof. (Azərbaycan), Selia Bell, dos. (İngiltərə), Arzu Baxşalıyev, dos. (məsul redaktor, Azərbaycan).

Coğrafiya elmləri

Nadir Məmmədov, prof. (Azərbaycan), Vladimir Kozodyorov, prof. (Rusiya), Anatoliy Yamaşkin, prof. (Rusiya), Niyaz Valiyev, prof. (Rusiya), Yaqub Qəribov, prof. (Azərbaycan), Məhəmməd Abdulyev, dos. (Azərbaycan), İlham Mərdanov, dos. (məsul redaktor, Azərbaycan), Zoya Abdullayeva, dos. (Azərbaycan)

Texnika elmləri

Telman Əliyev, akad. (Azərbaycan), Ağası Məlikov, AMEA-nın müxbir üzvü, prof. (Azərbaycan), Ramiz Əliquliyev, AMEA-nın müxbir üzvü, prof. (Azərbaycan), Nail Kaşapov, REA-nın müxbir üzvü, prof. (Rusiya), İtali Trivizan, prof. (İtaliya), Yevgeniy Moşev, prof. (Rusiya), Aleksandr Qolenişev-Kutuzov, prof. (Rusiya), Mixail Verxoturov, prof. (Rusiya), Leonid Ponomarenko, prof. (Ukrayna), Vladimir Qvozdov, prof. (Rusiya), Aqil Hüseynov, prof. (Azərbaycan), Cavanşir Məmmədov, prof. (Azərbaycan), Nikola Nikolov, dos. (Bolqarıstan), İqor Korşunov, dos. (Rusiya), Georgios Dafoulas, dos. (İngiltərə), Ulduz Ağayev, dos. (Azərbaycan), Şəhla Hüseynzadə, t.e.d., dos. (məsul redaktor, Azərbaycan), Turqay Hüseynov, dos. (Azərbaycan)

Сумгаитский государственный университет
Научные известия. Серия: Естественные и технические науки
РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
Зам. главного редактора

Аминага Садыгов, член-корр. НАНА, и.о. ректора
Эльшад Абдуллаев, доцент, проректор по науке и инновациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ

Физика
Математика

Альберт Гильмутдинов, akad. (Россия), Кямил Айдазаде член-корр. НАНА, проф. (Азербайджан), Билал Билалов, член-корр. НАНА, проф. (Азербайджан), Сеонг-Чу Ю, проф. (Южная Корея), Сулейман Озчелик, проф. (Турция), Казимир Янушкевич, проф. (Белоруссия), Камил Сабитов, проф. (Россия), Иман Аскерзаде, проф. (Турция), Шакир Нагиев, проф. (Азербайджан), Гамидулла Асланов, проф. (Азербайджан), Мамед Ягубов, проф. (Азербайджан), Вагиф Салманов, проф. (Азербайджан), Рашид Алиев, к.м.н. (Азербайджан), Тамелла Ахмедова, доц. (Азербайджан), Зафар Гусейнов, доц. (Азербайджан), Халида Гасанова, доц. (Азербайджан), Самир Оруджев, доц. (Азербайджан), Гюльнара Кулиева, доц. (отв. ред., Азербайджан), Хаяля Сейфуллаева, доц. (Азербайджан), Вюсалия Бабаджанова, доц. (Азербайджан), Джошгун Байрамов, доц. (Азербайджан), Севиль Латифова, доц. (Азербайджан)

Химия.

Рамиль Бахтизин, akad. (Россия), Вагиф Аббасов, akad. (Азербайджан), Дильгам Тагиев, akad. (Азербайджан), Махаммад Бабанлы, член-корр. НАНА, проф.

	<i>(Азербайджан), Татьяна Просочкина, проф. (Россия), Эльдар Ахмедов, проф. (Азербайджан), Мухтар Самедов, проф. (Азербайджан), Муса Мустафаев, доц. (отв. ред., Азербайджан), Валияддин Ахмедов, доц. (Азербайджан), Матлаб Гатамов, доц. (Азербайджан)</i>
Биология	<i>Эльшад Гурбанов, член-корр. НАНА, проф. (Азербайджан), Панах Мурадов, член-корр. НАНА, проф. (Азербайджан), Владимир Прокофьев, проф. (Россия), Улдуз Гашимова, проф. (Азербайджан), Селиа Белл, доц., (Англия), Арзу Бахшалиев, доц. (отв. ред., Азербайджан).</i>
География	<i>Владимир Козодёров, проф. (Россия), Анатолий Ямашкин, проф. (Россия), Нияз Валиев, проф. (Россия), Ягуб Гарибов, проф. (Азербайджан), Магомед Абдуев, доц. (Азербайджан), Ильхам Марданов, доц. (Азербайджан), Зоя Абдуллаева, доц. (Азербайджан)</i>
Технические науки	<i>Тельман Алиев, акад. (Азербайджан), Агаси Меликов, член-корр. НАНА, проф. (Азербайджан), Рамиз Алигулиев, член-корр. НАНА, проф. (Азербайджан), Наиль Кашапов, член корр. РАН, проф. (Россия), Италио Тривизан, проф. (Италия), Евгений Мошев, проф. (Россия), Александр Голенищев-Кутузов, проф. (Россия), Михаил Верховгуров, проф. (Россия), Леонид Понаморенко, проф. (Украина), Владимир Гвоздев, проф. (Россия), Агиль Гусейнов, проф. (Азербайджан), Джаваншир Мамедов, проф. (Азербайджан), Никола Николов, доц. (Болгария), Игорь Коршунов, доц. (Россия), Георгиус Дафоулас, доц. (Англия), Улдуз Агаев, доц. (Азербайджан), Шахла Гусейнзаде, д.т.н., доц. (отв. ред., Азербайджан), Тургай Гусейнов, доц. (Азербайджан)</i>

Sungayit State University
Scientific News. Series for Natural and Technical Sciences
EDITORIAL STAFF

Editor in Chief	<i>Aminagha Sadigov, corresponding member ANAS, acting Rector</i>
Deputy of Editor in Chief	<i>Elshad Abdullayev, ass.prof., Vice-Rector for Science and Innovations</i>

MEMBERS OF EDITORIAL STAFF

Physics	<i>Albert Gilmuddinov, acad. (Russia), Kamil Aydzadeh, Corresponding member of the ANAS, prof. (Azerbaijan), Bilal Bilalov, Corresponding member of the ANAS, prof. (Azerbaijan), Seong-Cho Yu, prof. (South Korea), Suleyman Ozchelik, prof. (Turkey), Kazimir Yanushkevich, prof. (Belarus), Kamil Sabitov, prof. (Russia), İman Asgerzadeh, prof. (Turkey), Şakir Naghiyev, prof. (Azerbaijan), Hamidulla Aslanov, prof. (Azerbaijan), Mammad Yagubov, prof. (Azerbaijan), Vagif Salmanov, prof. (Azerbaijan), Rashid Aliyev, ass.prof. (Azerbaijan), Tamella Ahmadova, ass.prof. (Azerbaijan), Zafar Huseynov, ass.prof. (Azerbaijan), Khalida Hasanova, ass.prof. (Azerbaijan), (отв. ред., Азербайджан), Samir Orujov, ass.prof. (Azerbaijan), Gulnara Guliyeva, ass.prof. (executive editor, Azerbaijan), Khayala Seyfullayeva, ass.prof. (Azerbaijan), Vusala Babajanova, ass.prof. (Azerbaijan), Joshgun Bayramov, ass.prof. (Azerbaijan), Sevil Latifova, ass.prof. (Azerbaijan)</i>
Mathematics	
Chemical sciences	<i>Ramil Bakhtizin, acad. (Russia), Vagif Abbasov, acad. (Azerbaijan), Dilgham Taghiyev, acad. (Azerbaijan), Mahammad Babanli, prof. (Azerbaijan), Tatyana Prosochkina, prof. (Russia), Eldar Ahmadov, prof. (Azerbaijan), Mukhtar Samadov, prof. (Azerbaijan), Musa Mustafayev, ass.prof. (executive editor, Azerbaijan), Valiyaddin Akhmadov, ass.prof. (Azerbaijan), Matlab Hatamov, ass.prof. (Azerbaijan)</i>
Biological sciences	<i>Elshad Qurbanov, prof. (Azerbaijan), Panah Muradov, prof. (Azerbaijan), Vladimir Prokofyev, prof. (Russia), Ulduz Hashimova, prof. (Azerbaijan), Selia Bell, ass.prof. (England), Arzu Baxshaliyev, ass.prof. (executive editor), (Azerbaijan).</i>
Geographical sciences	<i>Vladimir Kozodyorov, prof. (Russia), Anatoliy Yamashkin, prof. (Russia), Niyaz Valiyev prof. (Russia), Yagub Garibov, prof. (Azerbaijan), Mahammad Abduev, ass.prof. (Azerbaijan), İlham Mardanov, ass.prof. (Azerbaijan), Zoya Abdullayeva, ass.prof. (Azerbaijan)</i>
Technical sciences	<i>Telman Aliyev, acad. (Azerbaijan), Aghasi Malikov, Corresponding member of the ANAS, prof. (Azerbaijan), Ramiz Aliguliyev Corresponding member of the ANAS, prof. (Azerbaijan), Nail Kashapov, Corresponding member of the RAS, prof. (Russia), Italio Trivizan, prof. (Italia), Yevgeniy Moshev, prof. (Russia), Aleksandr Golenishev-Kutuzov, prof. (Russia), Mixail Verxoturov prof., (Russia), Leonid Ponomarenko, prof. (Ukraine), Vladimir Gvozdev, prof. (Russia), Agil Huseynov, prof. (Azerbaijan), Javanshir Mammadov, prof. (Azerbaijan), Nikola Nikolov, ass.prof. (Bulgaria), Igor Korshunov, ass.prof. (Russia), Georgios Dafoulas, ass.prof. (England), Ulduz Aghayev, ass.prof. (Azerbaijan), Shahla Huseynzadeh, Doctor of Technical Sciences, ass.prof. (executive editor Azerbaijan), Turgay Huseynov, ass.prof. (Azerbaijan)</i>

Kəsilmə şərtinə malik olan Dirak sisteminin xüsusi həlli haqqındaAllahverdiyeva Natavan Əhmədəli qızı **ORCID** 0000-0002-5600-2385Sumqayıt Dövlət Universiteti, Sumqayıt, Azərbaycan, dosent
natavanallahverdiyeva@sdu.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p>Məqalənin tarixçəsi Daxilolma tarixi: 20.10.2025 Düzəliş tarixi: 28.01.2026 Qəbul olunma tarixi: 06.02.2026</p>	<p>İnterval daxilində N sayda kəsilmə şərti olan kanonik şəkildə birözlü Dirak tənlikləri sisteminə baxılmışdır. Kəsilmə şərtləri daxilində həm həyəcanlanmamış Dirak tənlikləri sisteminin, həm də həyəcanlanmış Dirak tənlikləri sisteminin Yost tipli həlləri öyrənilir. Həyəcanlanmamış sistemin, yəni Pauli operatorunun doğurduğu tənliklər sisteminin Yost tipli həllinin aşkar göstərilişi tapılmışdır. Belə ki, kəsilmə nöqtələrinin doğurduğu hər bir intervalda həllin analitik ifadəsi alınmışdır. Dirak tənlikləri sisteminin Yost həllinin ödədiyi inteqral tənlik tapılmışdır</p>
<p>Açar sözlər Dirak sistemi, Pauli matrisi, kəsilmə şərti, Yost həlli, inteqral tənlik</p>	

Giriş

Aşağıdakı tənliklər sisteminə baxaq:

$$By' + \Omega(x)y = \lambda y, 0 < x < \infty, \quad (1)$$

burada $B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ Pauli tipli matrisidir,

$$\Omega(x) = \begin{pmatrix} p(x) & q(x) \\ q(x) & -p(x) \end{pmatrix},$$

 λ – spektral parametr, $p(x), q(x)$ – isə kompleks qiymətli funksiyalar, $y(x) = \begin{pmatrix} y_1(x) \\ y_2(x) \end{pmatrix}$ - axtarılanhəlldir və müəyyən $a_j \in (0, \infty), a_j < a_{j+1}, j = 1, \dots, N-1, N \geq 2$ nöqtələrində

$$y(a_j - 0) = M_j y(a_j + 0), j = 1, \dots, N \quad (2)$$

kəsilmə şərtlərini ödəyir. M_j matrisləri $M_j = \begin{pmatrix} \alpha_j & 0 \\ \beta_j & \alpha_j^{-1} \end{pmatrix}$, düsturları ilə təyin olunur belə ki, $\alpha_j \neq 0, \beta_j, j = 1, N$ həqiqi ədədlərdir.Təqdim olunan məqəədə (1)-(2) məsələsində $\Omega(x) \equiv 0$ olduqda həllin aşkar ifadəsi tapılmışdır. (1)-(2) məsələsinin Yost tipli həllinin ödədiyi inteqral tənlik tapılmışdır. Alınan nəticələr (1)-(2) məsələsi üçün müxtəlif spektral məsələlərin öyrənilməsində istifadə oluna bilər. Qeyd edək ki, kəsilmə şərti olmadıqda və ya bir kəsilmə şərti olduqda oxşar məsələlər [1]-[4] işlərində baxılmışdır.**Həyəcanlanmamış sistemin Yost həlli**

Əvvəlcə həyəcanlanmamış tənliklər sisteminə baxaq:

$$By' = \lambda y \quad (3)$$

Məlum olduğu kimi (3) sisteminin

$$y = e^{-\lambda Bx}, \quad (4)$$

matris-funksiyası şəklində həlli var.

İndi isə (3) tənliklər sisteminin (2) şərtlərini ödəyən həllini quraq. Bu həlli

$$E_0(x, \lambda) = \begin{cases} e^{-\lambda Bx}, & x > a_N \\ e^{-\lambda Bx} C_N, & a_{N-1} < x < a_N \end{cases}$$

burada C_N - məchul matrisdir. (2) şərtindən alırıq ki,

$$e^{-\lambda B a_N} C_N = M_N e^{-\lambda B a_N},$$

bərabərliyi ödənilir. Buradan isə alırıq:

$$C_N = e^{\lambda B a_N} M_N e^{-\lambda B a_N}.$$

Aşağıdakı matrisləri daxil edək:

$$M_N^\pm = \frac{1}{2} (M_N \pm B M_N B) \quad (5)$$

$B^2 = -I$, burada I vahid matrisdir, aşağıdakı münasibətləri tapırıq:

$$B M_N^+ = \frac{1}{2} B (M_N + B M_N B) = \frac{1}{2} (B M_N - M_N B)$$

$$M_N^+ B = \frac{1}{2} (M_N + B M_N B) B = \frac{1}{2} (M_N B - B M_N)$$

Deməli,

$$B M_N^+ = -M_N^+ B$$

bərabərliyi doğrudur. Eyni qayda ilə alırıq ki,

$$B M_N^- = M_N^- B.$$

Bərabərliyi doğrudur. Riyazi induksiya metodundan istifadə edərək isbat etmək olar ki,

$$B^n M_N^+ = (-1)^n M_N^+ B^n, \quad B^n M_N^- = M_N^- B^n$$

münasibətləri ödənilir. Buna görə də

$$\left. \begin{aligned} e^{-\lambda Bx} M_N^+ &= M_N^+ e^{\lambda Bx} \\ e^{-\lambda Bx} M_N^- &= M_N^- e^{-\lambda Bx} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

münasibətləri ödənilir. Asanlıqla yoxlamaq olar ki,

$$M_N = M_N^+ + M_N^-$$

münasibəti ödənilir. Buna görə də alırıq:

$$\begin{aligned} C_N &= e^{\lambda B a_N} M_N e^{-\lambda B a_N} = e^{\lambda B a_N} (M_N^+ + M_N^-) e^{-\lambda B a_N} = \\ &e^{\lambda B a_N} M_N^+ e^{-\lambda B a_N} + e^{\lambda B a_N} M_N^- e^{-\lambda B a_N} = M_N^+ e^{-\lambda B a_N} e^{\lambda B a_N} + \\ &+ e^{\lambda B a_N} e^{-\lambda B a_N} M_N^- = M_N^- + M_N^+ e^{-2\lambda B a_N}. \end{aligned}$$

Beləliklə alırıq ki, (1)-(2) məsələsi $\Omega(x) \equiv 0$ olduqda (a_{N-1}, ∞) aralığında

$$E_0(x, \lambda) = \begin{cases} e^{-\lambda Bx}, & x > a_N \\ M_N^- e^{-\lambda Bx} + M_N^+ e^{-\lambda(2a_N-x)B}, & a_{N-1} < x < a_N \end{cases}$$

şəklində xüsusi həllə malikdir. İndi isə bu həlli (a_{N-2}, a_N) aralığına elə davam etdirək ki, həmin həll (1) tənliyini və

$$y(a_{N-1} - 0) = M_{N-1} y(a_N + 0)$$

şərtini ödəsin. Həlli (a_{N-2}, a_{N-1}) aralığında $e^{-\lambda Bx} C_{N-1}$ şəklində axtarsaq və kəsilmə şərtini nəzərə alsaq aşağıdakı münasibət alınır:

$$M_{N-1} (M_N^- e^{-\lambda B a_{N-1}} + M_N^+ e^{-\lambda B(2a_N - a_{N-1})}) = e^{-\lambda B a_{N-1}} C_{N-1}.$$

Əgər

$$M_{N-1}^{\pm} = \frac{1}{2}(M_{N-1} \pm BM_{N-1}B)$$

matrislərini daxil etsək və

$$M_{N-1} = M_{N-1}^+ + M_{N-1}^-$$

eyniliyini nəzərə alsaq sonuncu bərabərlikdən tapırıq:

$$\begin{aligned} C_{N-1} &= e^{\lambda Ba_{N-1}} (M_{N-1}^+ + M_{N-1}^-) (M_N^- e^{-\lambda a_{N-1} B} + M_N^+ e^{-\lambda(2a_N - a_{N-1})B}) = \\ &= e^{\lambda Ba_{N-1}} (M_{N-1}^- + M_{N-1}^+) e^{-\lambda a_{N-1} B} (M_N^- + M_N^+ e^{-2\lambda a_N B}) = \\ &= (M_{N-1}^- + M_{N-1}^+ e^{-2\lambda a_{N-1} B}) (M_N^- + M_N^+ e^{-2\lambda a_N B}) \end{aligned}$$

Bu münasibətlərdən alırıq ki, (1)-(2) məsələsi $\Omega(x) \equiv 0$ olduqda $(a_{N-2}, +\infty)$ aralığında

$$E_0(x, \lambda) = \begin{cases} (M_{N-1}^- e^{-\lambda Bx} + M_{N-1}^+ e^{-\lambda(2a_{N-1}-x)B}) (M_N^- + M_N^+ e^{-\lambda a_N B}), & a_{N-2} < x < a_{N-1} \\ M_N^- e^{-\lambda Bx} + M_N^+ e^{-\lambda(2a_N-x)B}, & a_{N-1} < x < a_N \\ e^{-\lambda Bx}, & x > a_N \end{cases}$$

şəklində xüsusi həllə malikdir. Prosesi bu cür davam etdirsək induksiya metodu ilə alırıq ki, (1)-(2) məsələsinin $\Omega(x) \equiv 0$ olduqda (a_{j-2}, a_{j-1}) intervalında həlli

$$\begin{aligned} &(M_{j-1}^- e^{-\lambda Bx} + M_{j-1}^+ e^{-\lambda(2a_{j-1}-x)B}) (M_j^- + M_j^+ e^{-\lambda a_j B}) \times \\ &\times (M_{j+1}^- + M_{j+1}^+ e^{-\lambda a_{j+1} B}) \dots (M_N^- + M_N^+ e^{-\lambda a_N B}) \end{aligned}$$

şəklindədir. Bu mühakimələrdən aşağıdakı teoremin doğruluğunu alırıq:

Teorem. $\Omega(x) \equiv 0$ olduqda (1)-(2) məsələsinin $(0, +\infty)$ intervalında həlli

$$E_0(x, \lambda) = \begin{cases} (M_{j-1}^- e^{-\lambda Bx} + M_{j-1}^+ e^{-\lambda(2a_{j-1}-x)B}) (M_j^- + M_j^+ e^{-\lambda a_j B}) \times \\ \times \dots (M_N^- + M_N^+ e^{-\lambda a_N B}), & a_{j-2} < x < a_{j-1}, j = 2, \dots, N-1, a_0 = 0 \\ M_N^- e^{-\lambda Bx} + M_N^+ e^{-\lambda(2a_N-x)B}, & a_{N-1} < x < a_N \\ e^{-\lambda Bx}, & x > a_N \end{cases} \quad (7)$$

şəklində göstərilə bilən xüsusi həlli var.

Həyəcanlanmış sistemin Yost həlli

İndi (1) tənliyinə baxaq. Bu tənliyin elə $E(x, \lambda)$ həllini axtaraq ki, λ parametrinin hər bir həqiqi qiyməti üçün

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} E(x, \lambda) e^{\lambda Bx} = I \quad (8)$$

şərti ödənilsin. Bu cür həllə Yost həlli deyəcəyik.

(1) tənliyini

$$By' - \lambda y = -\Omega(x)y \quad (9)$$

şəklində yazmaq və sabitlərin variasiyası üsulunu tətbiq edək. (1) tənliyinin həllini

$$y(x, \lambda) = E(x, \lambda)C(x, \lambda) \quad (10)$$

şəklində axtaraq. (10) göstərilişini (9) tənliyində yazsaq alırıq

$$BE_0(x, \lambda)C'(x, \lambda) = -\Omega(x)y(x, \lambda),$$

Buradan isə

$$C'(x, \lambda) = E_0^{-1}(x, \lambda)B\Omega(x)y(x, \lambda),$$

münasibəti alınır, belə ki, $B^{-1} = -B$ olduğunu nəzərə aldıq. Axırını bərabərlikdən tapırıq:

$$C(x, \lambda) = C_0 - \int_x^{+\infty} E_0^{-1}(t, \lambda)B\Omega(t)y(t, \lambda)dt$$

Bu bərabərliyi (10)-da nəzərə alsaq

$$y(x, \lambda) = E_0(x, \lambda)C_0 - \int_x^{+\infty} E_0(x, \lambda)E_0^{-1}(t, \lambda)B\Omega(t)y(t, \lambda)dt$$

tənliyi alınar. (8) şərtinə əsasən $C_0 = I$ olduğunu alırıq .

Beləliklə, (1) tənliyinin Yost həlli

$$E(x, \lambda) = E_0(x, \lambda) - \int_x^{+\infty} E_0(x, \lambda)E_0^{-1}(t, \lambda)B\Omega(t)E(t, \lambda)dt, \quad (11)$$

inteqral tənliyini ödəyir, burada $E_0(x, \lambda)$ funksiyası (7) düsturu ilə təyin olunur. Digər tərəfdən, (11) inteqral tənliyinin həlli (1), (2), (3) məsələsinin Yost həllidir. Doğrudan da (11) tənliyindən törəmə alsaq, $E(x, \lambda)$ matris-funksiyasının (1), (2), (3) məsələsinin həlli olduğunu alırıq.

Ədəbiyyat

- [1]. Гасымов, М.Г. Определение системы Дирака по фазе рассеяния / М.Г.Гасымов, Б.М.Левитан // Докл. АН СССР, –1966, т.167, –№6, –с.1219-1222.
- [2]. Gasymov, M.G. An inverse problem of scattering theory for a system of Dirac equations of order $2n$ / Trudy Moskov. Mat. Obsh., 19, –1968, –p.41-112. (in Russian).
- [3]. Huseynov, H.M. An inverse scattering problem for a system of Dirac equations with discontinuity conditions // Proceedings of the Institute of Mathematics and Mechanics, National Academy of Sciences of Azerbaijan. Volume 40, Special Issue, –2014, –p. 215–225.
- [4]. Гусейнов, И.М. Задача рассеяния для системы Дирака с разрывным граничным условием / И.М.Гусейнов, Г.С.Рагимова, Ханмамедов Аг.Х // Journal of Contemporary Applied Mathematics, –2014, vol.4, no.1, –p.42-47.

Summary

On a special solution of the Dirac system with a discontinuous condition

Allahverdiyeva N.A.

Keywords: *Dirac system, Pauli matrix, discontinuity condition, Jost solution, integral equation*

A one-dimensional Dirac system in canonical form with N discontinuous points inside the interval is considered. In the presence of discontinuous conditions, the Jost-type solution is studied both for the unperturbed system of Dirac equations and for the perturbed system of Dirac equations. An explicit representation of the Jost type solution for the unperturbed system, i.e. for the system generated by the Pauli matrix, is found. Moreover, an analytical expression for the solution was found in each interval formed by the discontinuity points. An integral equation was obtained that satisfies a Jost-type solution.

Резюме

Об особом решении системы Дирака с разрывным условием

Аллахвердиева Н.А.


Ключевые слова: *система Дирака, матрица Паули, условие разрыва, решение Йоста, интегральное уравнение*

Рассмотрена одномерная система Дирака в канонической форме с N разрывными точками внутри интервала. При наличии разрывных условий изучается решение типа Йоста так для невозмущенной системы уравнений Дирака, как и для возмущенной системы уравнений Дирака. Найдено явное представление решения типа Йоста для невозмущенной системы, т.е. для системы порожденной матрицей Паули. При этом в каждом интервале, образуемом точками разрыва, найдено аналитическое выражение решения. Получено интегральное уравнение, которому удовлетворяет решение типа Йоста.

UOT 517.9

DOI 10.54758/16801245_2026_26_1_8

Öz-özünə qoşma nüvə tipli operator əmsallı ikinci tərtib diferensial operatorların yüksək tərtibli requlyarlaşmış iz düsturları

Hətəmovə Rəyfa Fikrət qızı  ORCID 0000-0001-9082-2769

Sumqayıt Dövlət Universiteti, Sumqayıt, Azərbaycan, müəllim
roya.hetemova@sdu.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p>Məqalənin tarixçəsi Daxilolma tarixi: 23.09.2025 Düzəliş tarixi: 22.12.2025 Qəbul olunma tarixi: 03.02.2026</p>	<p>Bu məqalədə son intervalda nüvə öz-özünə birləşən əmsalları olan ikinci dərəcəli diferensial operator tənlikləri nəzərdən keçirilir. Bəzi şərtlər yerinə yetirildikdə, bu operatorun spektri bu tənliyin əmsalları üçün araşdırılır, bu spektrin quruluşu müəyyənləşdirilir. Bu operatorun qətnamə teoremləri sübut edilmişdir. Daha yüksək sifarişli operatorların nizamlı izi üçün asimptotik düsturlar alırıq</p>
<p>Açar sözlər Hilbert fəzası, operator, operator-diferensial tənlik, sərhəd şərtləri, məxsusi ədədlər, məxsusi vektorlar, öz-özünə qoşma operator, nüvə tipli operator, rezolventa, spektr, requlyarlaşmış iz</p>	

Tədqiq olunmuş məqalədə sonlu parçada öz-özünə qoşma nüvə tipli operator əmsallı üçün ikinci tərtib diferensial tənliklərin yüksək tərtibli requlyarlaşmış iz düsturu alınmışdır. Baxılan məsələnin məxsus ədədlərinin quruluşu və bəzi spektral xassələr [1] məqaləsində araşdırılmışdır.

Qeyd edək ki, diferensial operatorların requlyarlaşmış iz düsturu ilk dəfə İ.Q. Qelfand və B.M. Levitan tərəfindən sonlu parçada Şturm-Liuvill tənliyi üçün alınmışdır [2]. Bəzi diferensial operatorlar üçün requlyarlaşmış iz düsturları L.A. Dikiy tərəfindən tədqiqi olunmuşdur [3].

Bu istiqamətdə M.G. Qasimov və B.M. Levitan [4], V.A. Sadovnicıy [6] və [5], V.A. Sadovnicıy [6] qiymətli tədqiqatlar vardır.

İlk dəfə R.Z. Xəlilova tərəfindən ikinci tərtib operator əmsallı diferensial tənliklər üçün requlyarlaşmış iz düsturu isbat olunmuşdur [7]. Bu istiqamətdə operator əmsallı diferensial tənliklər üçün E. Abdükadırov [8], M. Bayramoğlu [9], Ə.A. Adıgözəlov [10], F.Q. Maksudov, M. Bayramoğlu, Ə.A. Adıgözəlov [11], N.M. Aslanova [12], H.İ. Aslanov və K.G. Bədəlova [13] Albayrak İ., Köklük, Bayramov A.M. [14] tərəfindən iz düsturları tədqiq olunmuşdur.

Tutaq ki, H separabel Hilbert fəzasıdır.

$H_1 = L_2([0,1]; H)$ fəzasında

$$l(y) = -y''(x) + Q(x)y, \quad 0 \leq x \leq 1 \quad (1)$$

diferensial ifadəsi və

$$y(0) = 0, \quad y'(1) + ay(1) = 0, \quad a > 0 \quad (2)$$

sərhəd şərtləri ilə L operatoru təyin edək. Burada $Q(x)$ operator-funksiyası istənilən $x \in [0,1]$ üçün H Hilbert fəzasında öz-özünə qoşma nüvə tipli operator olduğu fərz olunur. Əlavə olaraq $Q(x)$ operator-funksiyasının aşağıda göstərilən şərtləri də ödədiyini fərz edirik:

1. $Q(x)$ operator-funksiyasının $(0,1)$ intervalında $2k$ tərtibli zəif törəmələri vardır və istənilən $x \in [0,1]$ üçün $Q_{(x)}^{(l)} (l = 0, 1, 2 \dots 2k)$ operatorlar H fəzasında öz-özünə qoşma nüvə tipli operatorlardır.

2. İstənilən $x \in [0,1]$ üçün $\|Q(x)\|_H < \frac{1}{2} \min_m (\mu_{m+1} - \mu_m)$ burada $\mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_m < \dots \sqrt{\lambda} \cos \sqrt{\lambda} + a \sin \sqrt{\lambda} = 0$ tənliyinin müsbət kökləridir.

3. H -fəzasında elə ortonormal $\{\varphi_n\}$ bazisi var ki,

$$\sum_{n=1}^{\infty} \|Q(x)\varphi_n\|_{H_1} < \infty$$

4. İstənilən $f \in H$ və $\kappa \geq 2$ üçün $\int_0^1 (Q^{(2k-1)}(x)f, f)_H dx = 0$

5. $l = 0, 1, \dots, 2k$ üçün $\|Q_{(x)}^{(l)}\|_{\sigma_1(H)}$ funksiyaları $[0,1]$ parçasında ölçülən, məhdud funksiyalardır. Burada $\sigma_1(H)$ - H Hilbert fəzasında təsir edən bütün nüvə tipli operatorlar fəzasıdır.

6. $[0,1]$ parçasının üç nöqtələrində $Q_{(0)}^{2j-1} = 0$, ($j=1,2, \dots k-1$) və $Q^{(j)}(1) = 0$, ($j = 0,1, \dots k$) şərtləri ödənilir.

L_0 ilə $l_0(y) = -y''(x)$ diferensial ifadəsi və (2) sərhəd şərtləri ilə təyin olunmuş operatoru işarə edək.

L_0 operatorunun spektri $\sqrt{\lambda} \cos \sqrt{\lambda} + a \sin \sqrt{\lambda} = 0$ tənliyinin müsbət köklərindən ibarət olan $\{\mu_m\}_{m=1}^{\infty}$ $0 < \mu_1 < \mu_2 < \dots < \mu_m < \dots$, çoxluğudur. Tənliyin hər bir kökü sonsuz tərtibli məxsusi ədəddir. μ_m məxsusi ədədinə uyğun ortonormal məxsusi vektor-funksiyalar

$$\psi_{mn}^{(0)}(x) = \alpha_m S_m \sqrt{\mu_m x} \cdot \varphi_n, n = 0, 1, \dots \quad (3)$$

şəklindədir. Burada

$$\alpha_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{1+a^{-1} \cos^3 \sqrt{\mu_m}}} \quad (4)$$

Qeyd edək ki, L_0 operatorunun μ_m -lərdən fərqli məxsusi ədədi yoxdur. Doğrudan da, əgər L_0 operatorunun μ_m -lərdən fərqli $\mu \in \{\mu_m\}_{m=1}^{\infty}$ məxsusi ədədi və uyğun $y(x)$ məxsusi funksiyası olardısı, bu halda L_0 operatoru öz-özünə qoşma operator olduğundan $y(x)$ funksiyası $\{\alpha_m S_m \sqrt{\mu_m x} \cdot \varphi_n\}_{m=1, n=1}^{\infty}$ sisteminin bütün elementlərinə ortoqonal olardı. Bu sistem isə tam sistem olduğundan $y(x)=0$ olardı. Bu sistem isə tam sistem olduğundan $y(x)=0$ olardı. Bu isə $y(x)$ -in məxsusi funksiya olmasına ziddir. Bu zidiyyət $\lambda \in \{\mu_m\}_{m=1}^{\infty}$ olduğunu göstərir. Deməli, məxsusi vektor-funksiyalar yalnız (3) şəklində elementlərdir.

L operatorunun spektrinin quruluşu haqqında [1] məqaləsində isbat olunmuşdur ki, L operatorunun spektri

$$\Omega_m = [\mu_m - \|Q(x)\|_{H_1}, \mu_m + \|Q(x)\|_{H_1}], m = 1, 2, \dots$$

parçalarının birləşməsindən ibarət çoxluğun alt çoxluğudur, belə ki, a) L operatorunun Ω_m parçasına daxil olan və μ_m -dən fərqli olan hər bir spektr nöqtəsi sonlu tərtibə malik olan izdə edilmiş məxsusi ədəddir; b) μ_m nöqtələri L operatorunun sonlu və ya sonsuz tərtibə malik olan məxsusi ədədi ola bilər;

c) $\{\lambda_{mn}\}_{n=1}^{\infty}$ ilə L operatorunun Ω_m parçasına daxil olan məxsusi ədədlərini işarə etsək, $\lim_{n \rightarrow \infty} \lambda_{mn} = \mu_m$ münasibəti doğrudur.

$\{\psi_{mn}\}_{m=1, n=1}^{\infty}$ ilə L operatorunun $\{\lambda_{mn}\}_{m=1, n=1}^{\infty}$ məxsusi ədədlərinə uyğun ortonormal məxsusi vektor-funksiyalar sistemini işarə edək.

Tutaq ki, $b_p = \left\{ \lambda: |\lambda| = \frac{1}{2} \min_m (\mu_{p+1} - \mu_p) \right\}$

$$B_{mn}^0 = (\cdot, \psi_{mn}^0)_{H_1} \psi_{mn}^0, B_{mn} = (\cdot, \psi_{mn})_{H_1} \psi_{mn}$$

Bu halda

$$R_\lambda^0 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{mn}^0(x)}{\mu_m - \lambda} \quad (5)$$

$$R_\lambda = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{mn}(x)}{\lambda_{mn} - \lambda} \quad (6)$$

$$R_\lambda - R_\lambda^0 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{mn}(x)}{\lambda_{mn} - \lambda} - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_{mn}^0(x)}{\mu_m - \lambda} \quad (7)$$

İsbat olunmuşdur ki, əgər λ ədədi L_0 və L operatorlarının requlyar nöqtəsi isə, onda $R_\lambda - R_\lambda^0$ operator H_1 fəzasında nüvə tipli operatorudur, yəni $(R_\lambda - R_\lambda^0) \leftarrow \sigma_1(H_1)$.

Eyni zamanda $R_\lambda - R_\lambda^0$ operatoru $\rho(\lambda)$ rezolvent çoxluğunda $\sigma_1(H)$ fəzasının normasına nəzərən analitik funksiyadır, yəni

$$\sum_{n=1}^{\infty} |\lambda_{np} - \mu_p| < \infty, \quad \rho = 1, 2, \dots \quad (8)$$

sıralar mütləq yığılandır.

İndi isə requlyarlaşmış iz düsturunun alınması üçün vacib olan bəzi münasibətləri göstərək. Qeyd etdik ki, $\lambda \in \rho(\lambda)$ olduqda $(R_\lambda - R_\lambda^0) \in \sigma_1(H_1)$. Onda (5), (6), (7) bərabərliklərdən

$$\text{tr}(R_\lambda - R_\lambda^0) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{\lambda_{mn} - \lambda} - \frac{1}{\mu_m - \lambda} \right) \quad (9)$$

olduğunu alarıq.

Bu bərabərliyin hər tərəfinin $\frac{\lambda^k}{2\pi i}$ -yə vurub alınmış ifadəni $|\lambda| = b_p = \frac{1}{2}(\mu_{p+1} - \mu_p)$ çevrəsi üzrə inteqrallaşsaq alarıq:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{|\lambda|=b_p} \lambda^k \text{tr}(R_\lambda - R_\lambda^0) d\lambda = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (\mu_m^k - \lambda_{mn}^k) \quad (10)$$

Əgər $R_\lambda = R_\lambda^0 - R_\lambda Q(x) R_\lambda^0$ bərabərliyini nəzərə alsaq aşağıdakı münasibətin doğru olduğunu alarıq:

$$R_\lambda - R_\lambda^0 = \sum_{j=1}^N (-1)^j R_\lambda^0 (Q R_\lambda^0)^j + (-1)^{j+1} R_\lambda (Q R_\lambda^0)^{N+1} \quad (11)$$

burada N istənilən natural ədəddir.

$R_\lambda^0 (Q R_\lambda^0)^j$ ($j = 1, 2, \dots$) və $R_\lambda (Q R_\lambda^0)^{N+1}$ operatorlarının H_1 fəzasında nüvə tipli operatorlar olduğunu nəzərə alsaq, (10) və (11) bərabərliklərindən alarıq:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} (\lambda_{mn}^k - \mu_m^k) = \sum_{j=1}^N M_p^j + \frac{(-1)^N}{2\pi i} \int_{|\lambda|=b_p} \lambda^k [R_\lambda (Q R_\lambda^0)^{N+1}] d\lambda \quad (12)$$

burada

$$M_p^j = \frac{(-1)^{j+1}}{2\pi i} \int_{|\lambda|=b_p} \lambda^k \text{tr} [(Q R_\lambda^0)^j] d\lambda \quad (13)$$

Sonuncu ifadəni müəyyən çevirmələr aparmaqla aşağıdakı şəkildə gətirmək olar:

$$M_p^j = \frac{(-1)^j \cdot k}{2\pi i \cdot j} \int_{|\lambda|=bp} \lambda^{k-1} \text{tr}[QR_\lambda^0] d\lambda \quad (14)$$

(1)-6) şərtlərindən istifadə etməklə aşağıdakı mühüm teorem isbat olunmuşdur:

Teorem 1. Əgər $Q(x)$ operator-funksiyası 1)-6) şərtlərini ödəyərsə, onda aşağıdakı bərabərliklər doğrudur:

$$\lim_{p \rightarrow \infty} M_p^j = 0, \quad j \geq 2k + 2 \quad (15)$$

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \int_{|\lambda|=bp} \lambda^k \text{tr} [R_\lambda (QR_\lambda^0)^{N+1}] d\lambda = 0, N \geq 2k + 2 \quad (16)$$

$$\lim_{p \rightarrow \infty} M_p^1 = \frac{(-1)^k}{2^{2k}} \cdot k \cdot [\text{tr} Q^{(2k-2)}(1) - \text{tr} Q^{(2k-2)}(0)] \quad (17)$$

Əgər (10), (12) bərabərliklərindən və Teorem 1-dən istifadə etsək, əsas nəticə olaraq aşağıdakı teoremi alarıq:

Teorem 2. Əgər $Q(x)$ operator funksiyası 1) - 6) şərtlərini ödəyirsə, onda aşağıdakı bərabərlik doğrudur:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (\lambda_{mn}^k - \mu_m^k) - k \cdot \sum_{j=2}^{2k+1} \frac{1}{j} (-1)^j \text{Res}_{\lambda=\mu_m} [\lambda^{k-1} \text{tr}(QR_\lambda^0)^j] \right\} = \frac{(-1)^k \cdot k}{4^k} [\text{tr} Q_{(1)}^{(2k-2)} - \text{tr} Q_0^{(2k-2)}] \quad (18)$$

Bu bərabərliyin sol tərəfindəki sıraya L operatorunun K tərtibli regulyarlaşmış izi deyilir. (18) düsturu isə L operatorunun K tərtibli regulyarlaşmış iz düsturu deyil.

Ədəbiyyat

- [1]. Hətəmovə, R.F. Hilbert fəzasında ikinci tərtib operator-diferensial tənlik üçün sonlu parçada bəzi sərhəd məsələsinin mövcudluq və yeganəliyinin tədqiqi // Journal of Baku Engineering University, Mathematics and Computer Science, –2022, Vol. 6, N 3, –pp. 92–96.
- [2]. Гельфанд, И.М. Об одном простом множестве для собственных значений дифференциального оператора второго порядка / И.М.Гельфанд, Б.М.Левитан. ДАН СССР, –1953, т. 88, №5, –с. 593–596.
- [3]. Дикси, Л.И. Об одном уравнении Гельфанда–Левитана // Докл. Акад. наук, –1953, т. 88, вып. 2, –с. 119–123.
- [4]. Гасымов, М.Г. О спектральном разложении функций в ряду сингулярных операторов Шмидта–Любища / М.Г.Гасымов, Б.М.Левитан. ДАН СССР, –1963, т. 151, №5, –с.1014–1017.
- [5]. Садовничий, В.А., Дубровский В.В. Об одном классе операторов, задаваемых симметричными данными и условиях абстрактного уравнения / В.А.Садовничий, В.В.Дубровский. Дифференц. уравнения, –1974, т. 173, №7, –с. 1264–1271.
- [6]. Садовничий, В.А. О спектральном разложении функций дифференциальных операторов высшего порядка // Дифференц. уравнения, –1966, т. 2, №12, –с. 1611–1624.
- [7]. Нəсəновə, Р.Ə. О регуляризации следа для операторного уравнения Шмидта–Любища // Функц. анализ, теория функций и их прил., Мехатклас, –1976, вып. 3, т. 1, –с. 154–161.
- [8]. Абдукаримов, Е. Формулы следа для регуляризованных систем дифф. // Вестник Московского Университета, Серия матем. и механики, –1967, №2, –с.17–24.
- [9]. Вауғатов, М. Высшие следы для абстрактного уравнения Шмидта–Любища // АН АзССР, Ин-т физики, –Баку,–1986, 34 с. Препринт АН Азерб. ССР, Инст. физики, №6.

- [10]. Адыгезалов, А.А. О следе разности двух дифференциальных уравнений операторов Штурма-Лиувилля с операторными коэффициентами // Изв. АН Азерб. ССР, сер. физ.-техн. и матем. наук, –1976, №3, –с.20–24.
- [11]. Максудов, Ф.Г. О регуляризованном следе операторов Штурма-Лиувилля на конечном отрезке с неограниченными операторными коэффициентами / Ф.Г.Максудов, М.Байрамоглу, А.А.Адыгезалов // Доклады АН СССР, –1984, т.277, №4, –с.795–799.
- [12]. Асланова Н.М. A trace formula of a boundary value problem for Sturm–Liouville operator // Sib. math. journal, –2008, vol. 40, №6, –pp.1207–1215 (Russian).
- [13]. Badalova, Konul H. On the spectrum and regularized trace of Sturm–Liouville operator equation given on a finite interval // Trans. of NAS of Azerbaijan, –2012, vol. XXXII, № 4, –pp. 29–34.
- [14]. Albayrak, I. A regularized trace formula for differential equations with trace nuclear class operator coefficients / I.Albayrak, K.Köklü, A.Bayramov // Rocky Mountain J. Math., –2010, vol. 40, №4, –pp. 1095–1110.

Summary

The high order regularized trace formulas for second order differential equation with self-adjoint nuclear class operator coefficients

Khatamova R.F.

Keywords: *Hilbert space, operator, operator-differential equation, boundary condition, eigenvalue, eigenfunction, spectrum, self-adjoint operator, nuclear type operator, resolvent, regularized trace.*

In this paper the second order differential-operator equations with nuclear self-adjoint coefficients are considered on the final interval. With some conditions on coefficients of this equation the spectrum of this operator is researched, the structure of this spectrum is defined. The theorems of resolvent of this operator are proved. We get asymptotic formulas for regularized trace of the highest order operators.

Резюме

Формулы регуляризованного следа высокого порядка для дифференциального уравнения второго порядка с ядерными операторными коэффициентами

Гатамова Р.Ф.

Ключевые слова: *Гильбертово пространство, оператор, операторно-дифференциальное уравнение, граничные условия, собственные значения, спектр, собственные операторные функции, самосопряжённый оператор, ядерные операторы, резольвента, регуляризованный след.*

В работе на конечном отрезке рассматриваются операторно-дифференциальные уравнения второго порядка с ядерными самосопряжёнными коэффициентами. При некоторых условиях на коэффициенты основного уравнения исследуется спектр данного оператора, определяется структура этого спектра. Вводятся и доказываются теоремы о резольвенте данного оператора. Поддаются асимптотические формулы для регуляризованного следа порядка данного оператора.

УДК 117.977

DOI 10.54758/16801245_2026_26_1_13

Оптимальное управление в системах, описываемых задачей Гурса для гиперболических интегро-дифференциальных уравнений второго порядка

Рзаева Вафа Гюлага гызы  ORCID 0000-0002-1786-3852

Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан, преподаватель
Vafa.rzayeva@sdu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	РЕЗЮМЕ
<p>История статьи Получено: 20.09.2025 Исправлено: 28.01.2026 Принято: 03.03.2026</p> <hr/> <p>Ключевые слова оптимальное управление, задача Гурса, гиперболические уравнения второго порядка, интегро-дифференциальные уравнения, условия оптимальности, особые управления, принцип максимума Понтрягина, вариационные методы, граничные условия, управляемые процессы</p>	<p>В работе рассматривается задача оптимального управления для процессов, описываемых интегро-дифференциальными уравнениями гиперболического типа второго порядка с граничными условиями Гурса. Исследуются вопросы оптимальности управлений, а также существование и свойства особых управлений, возникающих в рассматриваемом классе задач. На основе принципа максимума Понтрягина и методов вариационного исчисления получены необходимые условия оптимальности. Особое внимание уделяется анализу вырожденных случаев, при которых классические условия оптимальности оказываются недостаточными. Показано, что наличие интегральных слагаемых существенно влияет на структуру оптимальных и особых управлений. Полученные результаты могут быть использованы при математическом моделировании и оптимизации процессов, описываемых гиперболическими интегро-дифференциальными уравнениями</p>

В данной работе рассматривается негладкая задача оптимального управления, описываемая системой гиперболических уравнений второго порядка.

Постановка задачи. Допустим данный процесс задаётся системой интегро-дифференциальных уравнений Вольтерра гиперболического типа

$$z_{ix}(t, x) = f(t, x), z(t, x)u(t, x) + \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x g(t, x, \tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s)) ds d\tau, \quad (1)$$

$$(t, x) \in D = [t_0, t_1] \times [x_0, x_1]$$

с краевыми условиями

$$\begin{aligned} z(t_0, x) &= a(x), \quad x \in (x_0, x_1) \\ z(t, x_0) &= b(t), \quad t \in (t_0, t_1) \\ a(x_0) &= b(t_0) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $h(t, x, z, u)$, $g(t, x, \tau, s, z, u)$, $\alpha(k)$, $b(t)$ и $u(t, x)$ – заданные n -мерные вектор-функции.

$$u(t, x) \in U \subset R^n, (t, x) \in D \quad (3)$$

Под допустимыми будем понимать управляющие функции.

Предположим, каждому $u(t, x)$ отвечает единственное абсолютно непрерывное решение $z(t, x)$.

Рассмотрим задачу нахождения минимального значения функционала при ограничениях (1)-(3).

$$S(u) = \varphi(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k)). \quad (4)$$

Управление доставляющее минимальное значение функционалу (4) назовем оптимальным управлением.

Пусть $(u(t, x), z(t, x))$ - фиксированный, а $(\bar{u}(t, x) = u(t, x) + \Delta u(t, x), \bar{z}(t, x) = z(t, x) + \Delta z(t, x))$ - произвольные – допустимые процессы. Запишем приращение функционала качества:

$$\Delta S(u) = S(\bar{u}) - S(u) = \varphi(\bar{z}(\tau_1, x_1), \dots, \bar{z}(\tau_k, x_k)) - \varphi(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k)) \quad (5)$$

Ясно, что $\Delta z(t, x)$ решение краевой задачи

$$\begin{aligned} \Delta z_a(t, x) &= f(t, x, \bar{z}(t, x), \bar{u}(t, x)) - f(t, x, z(t, x), u(t, x)), \\ u(t, x) &+ \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x [g(t, x, \tau, s, \bar{z}(\tau, s), \bar{u}(\tau, s)) - g(t, x, \tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s))] ds d\tau \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Delta z(t_0, x) = 0, \quad \Delta z(t, x_0) = 0 \quad (7)$$

$\varphi(t, x)$ - некоторая n -мерная вектор-функция.

Из тождества (6) имеем:

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \psi'(t, x) \Delta z_{tx}(t, x) dx dt &= \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \psi'(t, x) [f(t, x, \bar{z}(t, x), \bar{u}(t, x)) - \\ &- f(t, x, z(t, x), u(t, x))] dx dt + \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \psi'(t, x) [g(t, x, \tau, s, \bar{z}(\tau, s), \bar{u}(\tau, s)) - \\ &- g(t, x, \tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s))] ds d\tau dx dt \end{aligned} \quad (8)$$

На основании теоремы функции имеет место следующее выражение:

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \psi'(t, x) \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x [g(t, x, \tau, s, \bar{z}(\tau, s), \bar{u}(\tau, s)) - \\ - g(t, x, \tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s))] ds d\tau dx dt = \\ = \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \psi'(t, x) [g(\tau, s, t, x, \bar{z}(t, x), \bar{u}(t, x)) - \\ - g(\tau, s, t, x, z(t, x), u(t, x))] ds d\tau dx dt. \end{aligned} \quad (9)$$

Введем функцию Гамильтона-Понтрягина для рассматриваемой задачи в виде

$$\begin{aligned} H(t, x, z(t, x), u(t, x), \varphi(t, x)) &= \psi'(t, x) f(t, x, z(t, x), u(t, x)) + \\ &+ \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \psi'(t, s) g(\tau, s, t, x, z(t, x), u(t, x)) ds d\tau. \end{aligned}$$

Тогда, учитывая тождества (8) и (9) приращение (5) целого функционала (4) можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Delta S(u) &= \varphi(\bar{z}(\tau_1, x_1), \dots, \bar{z}(\tau_k, x_k)) - \varphi(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k)) + \\ &+ \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \psi'(t, x) \Delta z(t, x) dx dt - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} [H(t, x, \bar{z}(t, x), \bar{u}(t, x), \psi(t, x)) - H(t, x, z(t, x), \\ &u(t, x), \psi(t, x))] dx dt. \end{aligned} \quad (10)$$

На основании формулы Тейлора можно написать следующие разложения

$$\begin{aligned} & \varphi(\bar{z}(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k)) - \varphi(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k)) = \\ & = \sum_{i=1}^k \frac{\partial \varphi'(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k))}{\partial a_i} \Delta z(\tau_i, x_i) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k \Delta z'(\tau_i, x_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k))}{\partial a_i \partial a_j} \Delta z(\tau_j, x_j) + \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & + o_1(\|\sum_{i=1}^k \|\Delta z(\tau_i, x_i)\|^2) \\ & H(t, x, \bar{z}, \bar{u}, \psi) - H(t, x, z, \bar{u}) = H'_z(t, x, z, \bar{u}, \psi) \Delta z + \\ & + \frac{1}{2} \Delta z' H_{zz}(t, x, z, \bar{u}, \psi) \Delta z + o_2(\|\Delta z\|^2). \end{aligned} \quad (12)$$

Здесь $\|\alpha\|$ - норма вектора $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)'$ определяемая формулой $\|\alpha\| = \sum_{i=1}^n |\alpha_i|$, где $o_1(\alpha)$ - величина более высокого порядка, чем α , т.е. $o(\alpha)/\alpha \rightarrow 0$ при $\alpha \rightarrow 0$, (1) штрих векторов операция скалярного произведения, а для матриц – операция транспонирования.

Учитывая разложения (12) из формулы приращения (10) после некоторых преобразований получим:

$$\begin{aligned} \Delta S(u) & = \sum_{i=1}^k \frac{\partial \varphi'(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k))}{\partial a_i} \Delta z_i(\tau_i, x_i) + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k \Delta z'(\tau_i, x_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k))}{\partial a_i \partial a_j} \Delta z_i(\tau_j, x_j) + \\ & + \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \psi'(t, x) \Delta z(t, x) dx dt - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} H'_z(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x)) z(t, x) dx dt - \\ & - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} [H'(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x), \psi(t, x)) - H(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x))] dx dt - \\ & - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} [H_z(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x), \psi(t, x)) - H_z(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x))] \Delta z(t, x) dx dt - \\ & - \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \Delta z'(t, x) H_{zz}(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x)) dx dt - \\ & - \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \Delta z'(t, x) [H_{zz}(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x), \psi(t, x)) - H_{zz}(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x))] \times \\ & \times \Delta z(t, x) dx dt + o_1(\|\sum_{i=1}^k \|\Delta z(\tau_i, x_i)\|^2) - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} o_2(\|\Delta z(t, x)\|^2) dx dt. \end{aligned} \quad (13)$$

Поскольку $\Delta z(t, x)$ абсолютно непрерывное решение краевой задачи (1) - (2), то можно записать, что

$$\Delta z(t, x) = \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \Delta z_{\tau\tau}(\tau, s) dt d\tau \quad (14)$$

$$\Delta z(\tau_i, x_i) = \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \alpha_i(t, x) \Delta z_{tx}(t, x) dx dt, \quad (15)$$

где $\alpha_i(t, x), i = \overline{1, n}$ характеристическая функция области $[t_0, T_i] \times [x_0, X_i], i = \overline{1, n}$. Учитывая формулы (13) и (14) получаем справедливость тождеств.

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^k \frac{\partial \varphi'(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k))}{\partial a_i} \Delta z(\tau_i, x_i) = \\ & = \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \sum_{i=1}^k \alpha_i(t, x) \frac{\partial \varphi'(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k))}{\partial a_i} \Delta z_{tx}(t, x) dx dt \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} H'_z(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x)) \Delta z(t, x) dx dt = \\ & = \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \int_t^{t_1} \int_x^{x_1} H'_z(\tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s), \psi(\tau, s)) ds d\tau \Delta z_{tx}(t, x) dx dt. \end{aligned} \quad (17)$$

Принимая во внимания тождества (16) и (17) получим, что

$$\begin{aligned} \Delta S(u) &= \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \sum_{i=1}^k \alpha_i(t, x) \frac{\partial \varphi'(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k))}{\partial a_i} \Delta z_{tx}(t, x) dx dt + \\ &+ \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \psi'(t, x) \Delta z_{tx}(t, x) dx dt - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \int_t^{t_1} \int_x^{x_1} H'_z(\tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s), \psi(\tau, s)) ds d\tau \times \\ &\times \Delta z_{tx}(t, x) dx dt - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} [H'_z(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x), \psi(t, x) - \\ &- H(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x))] dx dt - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} [H'_z(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x), \psi(t, x) - \\ &- H'_z(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x))] \Delta z(t, x) dx dt - \\ &- \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \Delta z'(t, x) [H'_{zz}(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x)) \Delta z(t, x) dx dt - \\ &- \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \Delta z'(t, x) [H'_{zz}(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x), \psi(t, x) - \\ &- H'_{zz}(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x))] \Delta z(t, x) dx dt + \\ &+ o_1(\|\sum_{i=1}^k \Delta z(\tau_i, x_i)\|) - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} o_2(\|\Delta z(t, x)\|^2) dx dt. \end{aligned} \quad (18)$$

Если предполагать, что вектор-функция $\psi(t, x)$ является решением интегрального уравнения

$$\begin{aligned} \psi(t, x) &= \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} H'_z(\tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s), \psi(\tau, s)) ds d\tau - \\ &- \sum_{i=1}^k \alpha_i(t, x) \frac{\partial \varphi(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k))}{\partial a_i}, \end{aligned} \quad (19)$$

то формула приращения (18) примет вид:

$$\begin{aligned} \Delta S(u) = & - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} [H(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x), \psi(t, x)) - H(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x))] dxdt - \\ & - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} [H_z(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x), \psi(t, x)) - H_z(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x))] \Delta z(t, x) dxdt + \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k \Delta z'_i(\tau_i, x_i) \frac{\partial^2 \varphi(z(\tau_1, x_1), \dots, z(\tau_k, x_k))}{\partial a_i \partial a_j} \Delta z_j(\tau_j, x_j) - \\ & - \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \Delta z'(t, x) H_{zz}(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x)) \Delta z(t, x) dxdt + \eta(u_i \Delta u(t, x)), \end{aligned} \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} \eta(u_i \Delta u) = & o_1 \left(\left[\sum_{i=1}^k \|\Delta z(\tau_i, x_i)\| \right]^2 \right) - \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} \Delta z'(t, x) \times \\ & \times [H_{zz}(t, x, z(t, x), u(t, x), \psi(t, x))] dxdt - \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} o_2(\|\Delta z(t, x)\|^2) dxdt. \end{aligned} \quad (21)$$

необходимые условия оптимальности.

Из краевой задачи (6)-(7) переходя к эквивалентному уравнению получим

$$\begin{aligned} \Delta z(t, x) = & \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x f(\tau, s, z(\tau, s), \bar{u}(\tau, s) - f(\tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s))) dsd\tau + \\ & + \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \int_{t_0}^{\tau} \int_{x_0}^s [g(\tau, s, \alpha, \beta, \bar{z}(\alpha, \beta), \bar{u}(\alpha, \beta)) - g(\tau, s, \alpha, \beta, z(\alpha, \beta), u(\alpha, \beta))] d\alpha d\beta dsd\tau. \end{aligned}$$

Отсюда получаем, что

$$\begin{aligned} \Delta z(t, x) = & \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x f(\tau, s, \bar{z}(\tau, s), \bar{u}(\tau, s)) - f(\tau, s, z(\tau, s), \bar{u}(\tau, s)) + \\ & + f(\tau, s, z(\tau, s), \bar{u}(\tau, s)) - f(\tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s))] dsd\tau + \\ & + \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \int_{t_0}^{\tau} \int_{x_0}^s [g(\alpha, \beta, \tau, s, \bar{z}(\alpha, \beta), \bar{u}(\alpha, \beta)) - g(\alpha, \beta, \tau, s, z(\alpha, \beta), \bar{u}(\alpha, \beta)) + \\ & + g(\alpha, \beta, \tau, s, z(\alpha, \beta), \bar{u}(\alpha, \beta)) - g(\alpha, \beta, \tau, s, z(\alpha, \beta), u(\alpha, \beta))] d\alpha d\beta dsd\tau. \end{aligned}$$

Здесь переходя к норме и используя условие Липшица, получаем:

$$\begin{aligned} \|\Delta z(t, x)\| \leq & Z_1 \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \|\Delta z(\tau, s)\| dsd\tau + \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \left[\|f(\tau, s, z(\tau, s), \bar{u}(\tau, s)) - f(\tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s))\| + \right. \\ & \left. + \int_{\tau}^t \int_s^x \|g(\alpha, \beta, \tau, s, z(\alpha, \beta), \bar{u}(\alpha, \beta)) - g(\alpha, \beta, \tau, s, z(\alpha, \beta), u(\alpha, \beta))\| d\alpha d\beta dsd\tau, \right. \end{aligned}$$

где $Z_1 = const > 0$.

Применим к последнему неравенству Лемму Гронуолла-Вендроффа, тогда

$$\begin{aligned} \|\Delta z(t, x)\| \leq & Z_2 \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \|f(\tau, s, z(\tau, s), \bar{u}(\tau, s)) - f(\tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s))\| + \\ & + \int_{\tau}^t \int_s^x \|g(\alpha, \beta, \tau, s, z(\alpha, \beta), \bar{u}(\alpha, \beta)) - g(\alpha, \beta, \tau, s, z(\alpha, \beta), u(\alpha, \beta))\| d\alpha d\beta dsd\tau, \end{aligned} \quad (22)$$

$(Z_2 = const > 0)$.

Пусть $u \in U$ произвольный вектор, $(\theta, \xi) \in [t_0, t_1] \times [x_0, x_1]$ - произвольная точка Лебега управления $u(t, x)$, а $\varepsilon > 0$ произвольное достаточно малое число, такое, что $\theta < \varepsilon < t_1$, $\xi < \varepsilon < x_1$. $u(t, x)$ определим по формуле

$$\Delta u_\varepsilon(t, x) = \begin{cases} V - u(t, x), & (t, x) \in [\theta, \theta + \varepsilon] \times [\xi, \xi + \varepsilon] \\ 0, & (t, x) \in D \setminus [\theta, \theta + \varepsilon] \times [\xi, \xi + \varepsilon]. \end{cases} \quad (23)$$

Через $\Delta z_\varepsilon(t, x)$ обозначим специальное приращение состояния $z(t, x)$ управления $u(t, x)$. Из оценки (22) получаем, что $\|\Delta z_\varepsilon(t, x)\| \leq Z_3 \varepsilon^2, (t, x) \in D$ (24), где $Z_3 = const > 0$.

Учитывая оценку (24) и формулу (23) из (20) получим разложение:

$$S(u + \Delta u_2) - S(u) = -\varepsilon^2 [H(\theta, \xi, z(\theta, \xi), v) - H(\theta, \xi, z(\theta, \xi), u(\theta, \xi))] + o(\varepsilon v)$$

Теорема 1. Для оптимальности допустимого управления $u(t, x)$ необходимо, чтобы неравенство

$$H(\theta, \xi, z(\theta, \xi), v, \psi(\theta, \xi)) - H(\theta, \xi, z(\theta, \xi), u(\theta, \xi), \psi(\theta, \xi)) \leq 0 \quad (25)$$

выполнялось для всех $(\theta, \xi) \in [t_0, t_1] \times [x_0, x_1]$.

Сформулированное необходимое условие оптимальности является естественным распространением на рассматриваемую задачу принципа максимума Л.С.Понтрягина. Это условие становится не эффективным, т.е. его нельзя использовать для нахождения направлений подозрительных на оптимальность, если соотношение (25) тождественно выполняется вдоль управления.

В соответствии с этим допустимое управление $u(t, x)$ будем называть особым, если при всех $v \in U$ неравенство (25) выполняется как тождественное равенство на D .

Перейдем к получению необходимого условия оптимальности особых управлений.

Введем обозначения

$$\begin{aligned} f_z[t, x] &\equiv f_z(t, x, z(t, x), u(t, x)), \quad g_z[t, x, \tau, s] \equiv g_z(t, x, \tau, s, z(\tau, s), u(\tau, s)) \\ \Delta_{\bar{u}} f[t, x] &\equiv f(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x)) - f(t, x, z(t, x), u(t, x)) \\ \Delta_{\bar{u}} f_z[t, x] &\equiv f_z(t, x, z(t, x), \bar{u}(t, x)) - f_z(t, x, z(t, x), u(t, x)) \end{aligned}$$

Из краевой задачи получим, что $\Delta z(t, x)$ является решением линейризованной краевой задачи

$$\Delta z_{tx}(t, x) = f_z[t, x] \Delta z(t, x) + \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x q_z[t, x, \tau, s] \Delta z(\tau, s) ds d\tau + \quad (26)$$

$$+ \Delta_{\bar{u}} f[t, x] + \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \Delta_{\bar{u}} g[t, x, \tau, s] ds d\tau + h_1(t, x; \Delta u)$$

$$\Delta z(t_0, x) = 0 \quad (27)$$

$$\Delta z(t, x_0) = 0, \quad R(t, x, t, x) = E$$

Здесь

$$h_i(t, x; \Delta u) = \Delta_{\bar{u}} f_z[t, x] \Delta z(t, x) + \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \Delta_{\bar{u}} g_z[t, x, \tau, s] \Delta z(\tau, s) ds d\tau + \quad (28)$$

$$+ \int_{t_0}^{t_1} \int_{x_0}^{x_1} o_4(\|\Delta z(\tau, s)\|) ds d\tau + o_3(\|\Delta z(t, x)\|).$$

Пусть $R(t, x, \tau, s)$ ($n \times n$)-матричная функция являющееся решением задачи

$$R_x(t, x) = R(t, x, \tau, s) f_z[\tau, s] + \int_{\tau}^t \int_s^x R(t, x, \alpha, \beta) g_z[\alpha, \beta, \tau, s] d\alpha d\beta,$$

$$R(t, x, \tau, x) = 0, R(t, x, t, s) = 0, R(t, x, t, x) = E.$$

Тогда решение линеаризованной краевой задачи (26)-(27) может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} \Delta z(t, x) = & \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x R(t, x, \tau, s) \Delta_{\bar{u}} f(\tau, s) ds d\tau + \\ & + \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x \left[\int_{\tau}^t \int_s^x R(t, x, \alpha, \beta) \Delta_{\bar{u}} g(\alpha, \beta, \tau, s) d\alpha d\beta \right] d\tau ds + \\ & + \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x R(t, x, \tau, s) h_1(\tau, s; \Delta u) ds d\tau. \end{aligned} \quad (29)$$

Если ввести обозначения

$$\begin{aligned} h_2(t, x; \Delta u) = & \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x R(t, x, \tau, s) h_1(\tau, s; \Delta u) ds d\tau \\ M(\tau, s, u(\tau, s)) = & R(t, x, \tau, s), f(\tau, s, z(\tau, s, u(\tau, s))) + \\ & + \int_{\tau}^t \int_s^x R(t, x, \alpha, \beta) g(\alpha, \beta, z(\tau, s), u(\tau, s)) d\alpha d\beta, \end{aligned}$$

то представление (29) может быть записано в виде

$$\begin{aligned} \Delta z(t, x) = & \int_{t_0}^t \int_{x_0}^x [M(t, x, \tau, s, \bar{u}(\tau, s)) - \\ & - M(t, x, \tau, s, u(\tau, s))] ds d\tau + h_2(t, x; \Delta u). \end{aligned} \quad (30)$$

Ədəbiyyat

- [1]. Васильев, О.В. Методы оптимизации и их приложения. Часть 2. / О.В.Васильев, В.А.Срогио, В.А.Терлецкий –Новосибирск: Наука, –1990, –211 с.
- [2]. Ладыженская, О.А. Линейные и квазилинейные уравнения гиперболического типа / О.А.Ладыженская – М.: Наука, –1981.
- [3]. Мансимов Х.Б., Марданов М.Дж. Качественная теория оптимального управления системами Гурса-Дарбу / Х.Б.Мансимов, М.Дж.Марданов –Баку: Элм, –2010, –360 с.
- [4]. Понтрягин, Л.С. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С.Понтрягин, В.Г.Болтянский, Р.В.Гамкрелидзе [и др.] – М.: Наука, –1983, –393 с.

Xülasə

İki tərtibli hiperbolik integro-diferensial tənliklər üçün Qursa məsələsi ilə təsvir olunan sistemlərdə optimal idarəetmə məsələləri

Rzayeva V.G.

Açar sözlər: optimal idarəetmə, Qursa məsələsi, ikinci tərtibli hiperbolik tənliklər, integro-diferensial tənliklər, optimallıq şərtləri, xüsusi idarəetmələr, Pontryagin maksimum prinsipi, variasiya üsulları, sərhəd şərtləri, idarə olunan proseslər.

İşdə ikinci tərtibli hiperbolik tipli integro-diferensial tənliklərlə təsvir olunan proseslər üçün optimal idarəetmə problemi tədqiq olunur. Optimallıq məsələləri araşdırılır və bu sinif problemlərdə yaranan xüsusi idarəetmələr təhlil edilir. Pontryagin maksimum prinsipi və variasiya üsulları istifadə olunmaqla optimallığın zəruri şərtləri əldə edilmişdir. Xüsusi hallara ayrıca diqqət yetirilir, burada klassik optimallıq şərtləri kifayət etmir. Göstərilmişdir ki, integral tərkiblərin mövcudluğu optimal və xüsusi idarəetmələrin strukturuna əhəmiyyətli təsir göstərir. Alınan nəticələr

hiperbolik integro-differensial tənliklərlə təsvir olunan idarə olunan proseslərin riyazi modelləşdirilməsi və optimallaşdırılması üçün istifadə oluna bilər.

Summary

**Optimal control problems in systems governed by the Goursat problem
for second-order hyperbolic integro-differential equations**

Rzayeva V.G.

Key words: *optimal control; Gurs problem; second-order hyperbolic equations; integro-differential equations; optimality conditions; singular controls; Pontryagin maximum principle; variational methods; boundary conditions; controlled processes.*

This work investigates the optimal control problem for processes described by second-order hyperbolic integro-differential equations with Gurs-type boundary conditions. The study addresses the optimality of controls and analyzes singular controls arising in this class of problems. Using the Pontryagin maximum principle and variational methods, necessary conditions for optimality are derived. Special attention is given to degenerate cases where classical optimality conditions are insufficient. It is shown that the presence of integral terms significantly affects the structure of optimal and singular controls. The obtained results can be applied to the mathematical modeling and optimization of controlled processes governed by hyperbolic integro-differential equ

Neftlərin nəqli zamanı xlor üzvi birləşmələrinin təyində istifadə olunan ölçü vasitələrinin və avadanlıqların düzgün tətbiqinin vacibliyi

¹Nurullayev Vəli Xanağa oğlu ORCID 0000-0002-9608-600X

²Qurbanov Hüseyin Ramazan oğlu ORCID 0000-0003-0167-5707

³Qasımzadə Aysel Vəliyəddin qızı ORCID 0000-0002-5461-7677

⁴Əliyeva Qüdrət Məşədi qızı

Azərbaycan Respublikası Dövlət Neft Şirkətinin (SOCAR) neft kəmərlərinin idarəsi, Bakı, Azərbaycan, 1- tex.e.d.

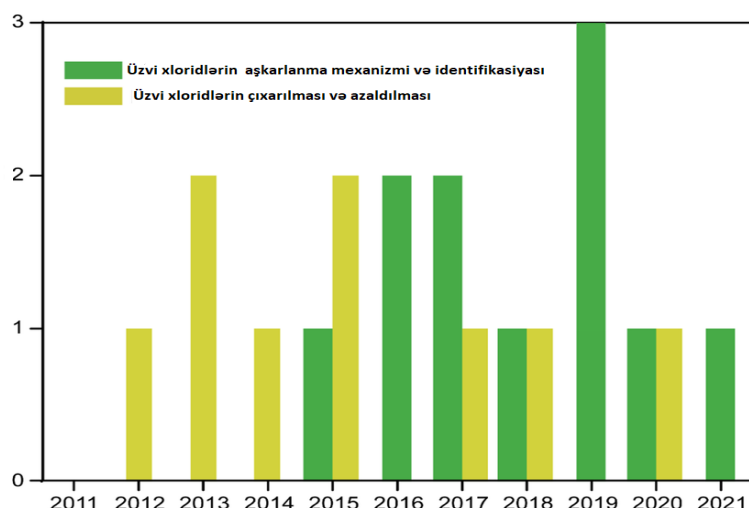
Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, Azərbaycan, 2- professor, 3- dosent, M.Nagiyev adına Kataliz və Qeyri Üzvi Kimya İnstitutu, Bakı, Azərbaycan, 4-k.f.d., dosent

veliehet1973@mail.ru, ebikib@mail.ru, qasimzade92@inbox.ru, qudrataliyeva@gmail.com

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p><i>Məqalənin tarixçəsi</i> Daxilolma tarixi: 09.12.2025 Düzəliş tarixi: 02.02.2026 Qəbulolunma tarixi: 03.03.2026</p>	<p><i>Məqalədə xlorüzvi birləşmələr (XÜB) tərkibli neftlərin nəqli və emalı zamanı korroziyanın əsas mənbələrindən biri olduğu göstərilir və XÜB-in normadan artıq olmasının istehsalat, iqtisadi və ekoloji risklər yaratdığı vurğulanır. Bu məqsədlə XÜB-in idarə olunması, mənşəyinin təhlili və monitorinqinin düzgün təşkili üzrə müasir yanaşmalar təqdim edilir. Model neftlər üzərində buxar fazalı nümunə götürmə və qaz xromatoqrafiyası ilə aparılmış tədqiqatlar göstərmişdir ki, üsul neftin növündən və tərkibindən asılı olmayaraq XÜB-in sürətli aşkarlanmasına imkan verir. Düzgün tətbiq olunduqda bu yanaşma çirklənmiş neftin boru kəmərlərinə və emal zavodlarına daxil olmasının qarşısını vaxtında almağa şərait yaradır</i></p>
<p><i>Açar sözlər</i> xlor üzvi birləşmələr, hidrotəmizləmə, reforminq, potensiometrik titrləmə, mikrokulonometr, rentgen flüorosensiya, xromatoqrafiya</p>	

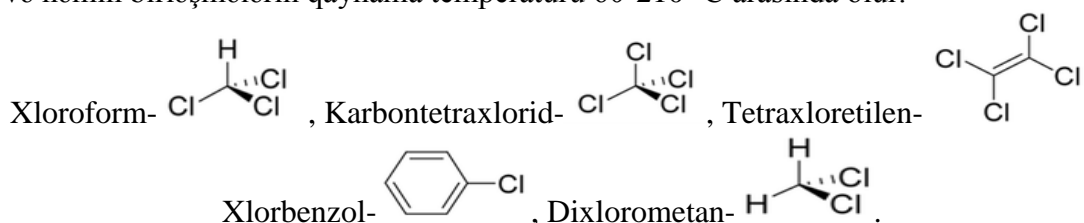
Giriş

Azərbaycanda və bir sıra digər neft nəql edən ölkələrdə xlorüzvi birləşmələrin (XÜB) boru kəmərlərinə və neft emalı zavodlarına daxil olması ciddi texnoloji və iqtisadi problemlərə səbəb olmuşdur. Bu vəziyyətin ən qabarıq nümunəsi 2019-cu ildə Rusiyanın “Drujba” boru kəmərinə baş verən hadisədir ki, XÜB-lərin yalnız hər on gündən bir analiz edilməsinə dair normativ tələblər böyük miqyaslı itkilərlə nəticələnmişdir [1]. Neft emalı zavodlarında XÜB-lər əsasən benzinin hidrogenlə təmizlənməsi mərhələsində hidrolizə uğrayaraq HCl və ammonium xlorid əmələ gətirir və bu maddələr xüsusilə hava ilə soyudulan qurğularda intensiv korroziyaya səbəb olur. XÜB-lərin qaynama temperaturlarının benzin fraksiyaları ilə üst-üstə düşməsi əsas zədələnmənin katalitik reforminq və izomerləşmə qurğularında baş verməsinə gətirib çıxarır və bəzi hallarda katalizatorların aktivliyinin itirilməsinə səbəb olur. Son onillikdə (2010–2025) aparılan tədqiqatlar göstərir ki, XÜB-lərin yaratdığı risklərin azaldılması onların çıxarılması, miqdarının azaldılması və aşkarlanma mexanizmlərinin təkmilləşdirilməsi ilə bağlı müxtəlif yanaşmaların inkişafını tələb edir (şəkil 1).

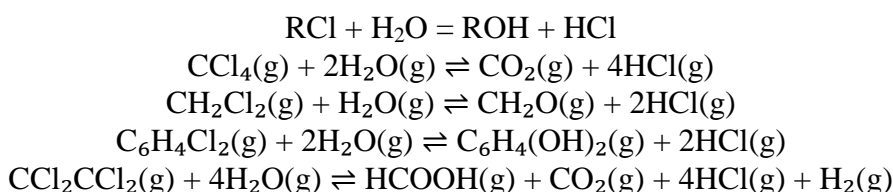


Şəkil 1. XÜB-lərin statik təhlili (2010–2025-ci illər, 1-normal, 2-riskli, 3-kritik hədd).

Tədqiqatlara əsasən neftdə olan XÜB-lərin komponentlərinin sxematik təsviri verilmiş ardıcılıqla dəyişir və həmin birləşmələrin qaynama temperaturu 60-210 °C arasında olur.



Neftdə mövcud olan xlorüzvi birləşmələrin (XÜB) hidrolizi nəticəsində korroziyaya səbəb ola bilən qaz fazalı HCl-in əmələ gəlmə mexanizmi aşağıdakı reaksiyaya uyğun olaraq həyata keçirilir:



Göstərilən reaksiyaların nəticəsindən görünürki proses vaxtında aşkarlanmasa qlobal təhlükələr yarana bilər.

Tədqiqatın metodikası

XÜB-lərin yaratdığı potensial təhlükələrin qarşısını almaq üçün onların təyini üzrə bir sıra üsullar və standartlar mövcuddur.

Potensiometrik titrləmə üsulu (argentometriya): Potensiometrik titrləmə üsulu (argentometriya) XÜB-lərin təyində ən geniş istifadə olunan metodlardan biridir və ГОСТ P 52247-2004 (Metod A), ASTM D4929 (Metod A) və UOP 588 standartlarında təsvir olunduğu kimi, nümunənin qeyri-üzvi duzlardan təmizlənməsindən sonra üzvi xloridlərin dehalogenləşməsi və əmələ gələn xloridlərin titrlənməsi prinsipi ilə işləyir. Şüşə və gümüş/gümüş-xlorid elektrodlarına malik GT-200 titratoru bu standartlara tam uyğun olaraq həm manuel, həm də avtomatik rejimdə yüksək dəqiqliklə neft və karbohidrogenlərdə üzvi xloridlərin təyini həyata keçirir.

Mikrokulonometrik titrləmə üsulu: XÜB-lərin ümumi miqdarını təyin edən mikrokulonometrik metod ГОСТ P 52247-2004 (Metod B), ASTM D4929 (Metod B), UOP 910, ASTM D5808, UOP 779, EN 14077, ASTM D5194 və ASTM D7457 standartlarında təsvir olunur və ilkin distillə,

nümunənin yanması və mikrokulometrik titrləmə mərhələlərini əhatə etməklə yanaşı, MDC-210 və TOX-300 detektorlarında 0,05 ppm, NSX-2100 analizatorunda isə 0,01 ppm həssaslıqla təyinatı imkan verir ki, bu da standartlarda tələb olunan 1 ppm həddindən xeyli yüksək dəqiqlik deməkdir.

Rentgen flüorosensiya üsulu: Neftdə XÜB-lərin təyini üçün tətbiq olunan rentgen flüoresansiya üsulu ГОСТ P 52247-2004 (Metod B) və 2017-ci ildə ASTM D4929-a (Metod C) daxil edilmiş olub, Bregg difraksiya prinsipi ilə işləyən dalğa dispersiyalı spektrometriyanın müdaxilə edən amillərin olmaması səbəbindən yüksək dəqiqlik təmin etməsi ilə yanaşı, monoxromatik dispersiya prinsipi əsasında fəaliyyət göstərən CLORA 2XP analizatorunun XÜB-ləri 0,07 ppm-ə qədər təyin edərək mövcud standartların həssaslıq tələblərini üstələməsi və əlavə olaraq aşağı qatılı kükürdün analizində də istifadə olunması ilə xarakterizə olunur.

Konduktometrik detektorlaşma ilə ion xromatoqrafiya: ГОСТ P 57033-2016 və UOP 991-13 standartlarında təsvir olunan üsul neftdə üzvi halogenlərin iz miqdarlarının (0,1 ppm-ə qədər) təyini üçün istifadə olunur və Mitsubishi AQF-2100H sistemi həm üzvi xlor, həm də digər halogen və kükürd tərkibli birləşmələri etibarlı şəkildə müəyyən edə bilir. Rentgen flüoresansiya və konduktometrik detektorlu ion xromatoqrafiyası yüksək həssaslıqla müxtəlif tərkibli neftlərin təhlilinə imkan verdiyi halda, potensiometrik və mikrokulonometrik metodlar tərkibində halogenid və kükürlü maddələr olan nümunələrə tətbiq oluna bilmir. Müşahidələr göstərir ki, benzin fraksiyasında XÜB-lərin 40–50 ppm olması nəql xətlərində 2–3 gün ərzində korroziya yarada və Samara–Belarus kəmərinə olduğu kimi milyon tonlarla neftin çirklənməsinə səbəb ola bilər. Hazırlanmış metod [5] XÜB-lərin real vaxtda monitorinqini və Henri qanununa əsaslanan buxar xromatoqrafiyası ilə xətt daxili analizi təmin edərək istehsal proseslərinin avtomatlaşdırılmasına və müəssisələrin rəqəmsal transformasiyasına şərait yaradır [6].

Nəticələr və onların müzakirəsi

Neftin keyfiyyətinə nəzarətin avtomatlaşdırılması nümunə hazırlanması zamanı baş verə bilən sistemə itkiləri azaldır və XÜB-lərin təyininin dəqiqliyini artırır [7]. Bu məqsədlə tətbiq olunan SARA analizi qazsızlaşdırılmış neftin doymuş karbohidrogenlərə, aromatlara, qatranlara və asfaltenlərə ayrılmasına əsaslanır və Azərbaycanın qarışıq model neftləri üçün nəticələr Cədvəl 1-də göstərilmişdir [8].

Cədvəl 1.

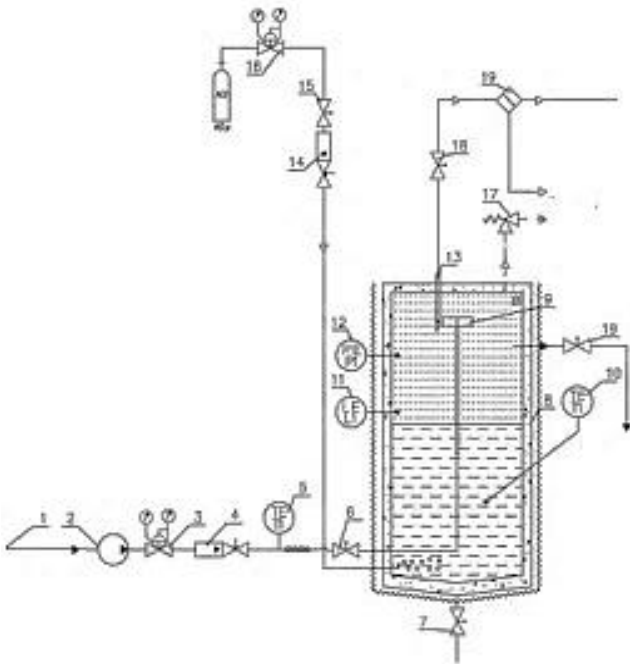
SARA analizinin nəticələri

Karbohidrogenlər	Azərbaycanın müxtəlif qarışıq nefti			
	№1	№2	№3	№4
q.b.–180 °C				
Neftə görə çıxım, %	0	16,7	16,5	18,5
Парафино-нафтены	–	92,5	90,2	92,0
Aromatik karbohidrogenlər:				
Monoaromatik	–	6,9	9,2	7,5
Biaromatik	–	0,6	0,6	0,5
180–350 °C				
Neftə görə çıxım, %	50,0	38,3	28,5	26,5
Парафин-нафтен	70,8	75,4	83,1	88,2
Aromatik karbohidrogenlər:				
Monoaromatik	10,7	13,3	8,5	7,1
Biaromatik	13,7	10,0	7,9	4,5
Poliaromatik	4,8	1,3	0,5	0,2
>350 °C				
Neftə görə çıxım, %	50,0	45,0	55,0	55,0
Парафин-нафтен	32,7	20,7	42,3	66,4
Aromatik karbohidrogenlər:				
Monoaromatik	11,5	11,9	10,0	9,9
Biaromatik	5,2	5,5	4,7	3,6

Poliaromatik	27,3	37,7	24,2	12,8
Neytral qatranlar	7,8	7,0	5,9	2,7
Turş qatranlar	11,5	12,8	9,5	4,0
Asfaltenlər	4,1	4,6	3,4	0,9
Neftə görə cəmi				
Parafin-naften	51,8	53,6	61,8	76,9
Aromatik karbohidrogenlər:				
Monoaromatik	11,1	11,6	9,4	8,7
Biaromatik	9,4	6,3	4,8	3,2
Poliaromatik	16,1	17,5	13,5	7,1
Neytral qatranlar	3,9	3,2	3,2	1,5
Turş qatranlar	5,8	5,8	5,2	2,2
Asfaltenlər	2,1	2,1	1,9	0,5

Nümunələrə əvvəlcədən məlum miqdarda XÜB əlavə edilmiş və daha sonra buxar fazalı nümunə götürmə qurğusundan istifadə olunaraq qaz xromatoqrafiyası ilə onların qatılığı müəyyən edilmişdir. Tədqiqatlar ГОСТ 33342–2015 və ГОСТ Р 52247–2004 standartlarının tələblərinə uyğun olaraq B metoduna əsasən aparılmış, eyni zamanda 5–200 ppm diapazonunda müxtəlif XÜB konsentrasiyaları ilə təmiz nümunələrin müqayisəli analizi həyata keçirilmişdir. Prosesin iş prinsipi şəkil 2-də göstərildiyi kimi, neft nümunəsinin qızdırılmış xəttədən nümunə götürmə cihazına ötürülməsi və 20–150 °C temperaturda üzvi xlor, kükürd tərkibli birləşmələr və formaldehidin buxar fazasına keçməsi əsasında qurulmuşdur.

Nümunə götürmə cihazı komponentlərin buxar fazasına keçirilməsini təmin etmək üçün qızdırılan inert qazla işləyir və tarazlıq yarandıqda buxar analitik xromatoqrafın dozalayıcı dövrəsinə ötürülür. Buxar–maye nisbətinin 10–90% intervalında saxlanması və 20–150 °C-də termostatlaşdırma ölçmələrin dəqiqliyini artırır, dozalayıcı dövrəyə daxil olan 100 ml–5 ml nümunə isə xromatoqrafik sütunlarda ayrılaraq detektorda qeydə alınır. Analizatorun kalibrənməsi sertifikatlaşdırılmış qarışıqlarla avtomatik həyata keçirilir və nəticələr 5–200 ppm diapazonunda aparılmış paralel xromatoqrafik və rentgen-flüoresans ölçmələri ilə ГОСТ 33342–2015-in B metodu üzrə müqayisədə yüksək dəqiqlik göstərmişdir. Sınaqlar göstərir ki, üsul neftin tərkibindən asılı olmayaraq XÜB-lərin birbaşa təyini təmin edir, yalnız 200 ppm-dən yüksək qatılıqlarda durulaşdırma tələb olunur və ilkin distillə və titrləmə mərhələlərinin aradan qaldırılması sayəsində istehsal proseslərində operativ monitoring üçün üstünlük yaradır.



Şəkil 2. Buxar fazalı nümunə götürən cihazdan istifadə edərək qaz xromatoqrafiyası metodunun sxemi.

Cədvəl 2.

Müxtəlif analiz üsullarının müqayisəli nəticələri

XÜB	Atomar xlorə görə hesablanmış miqdarı, ppm				
	№1	№2	№3	№4	№5
	(5 ppm)	(10 ppm)	(20 ppm)	(50 ppm)	(200 ppm)
Karbon tetraxlorid	0,924	1,801	3,752	9,362	52,111
Trixloroetilen	0,130	0,134	0,143	0,174	0,413
Xloroform	0,330	0,456	0,733	1,455	5,746
Tetraxloretilen	0,047	0,099	0,194	0,433	2,054
1,1,1,2-Tetraxloroetan	0	0	0,032	0,068	0,310
Pentaxloretilen	0	0	0,158	0,184	0,385
Heksaxloretilen	0	0	0	0,136	0,187
1,1,2,2-Tetraxloretilen	0	0	0	0	0,366
Cəmi	1,432	2,491	5,011	11,813	61,572
XÜB-lərin naftaya görə hesablanmış miqdarı.	4,50	7,33	15,73	45,34	309,46
XÜB-lərin naftada miqdarı. ГОСТ 33342–2015 görə	5	10	20	50	215
Dəqiqlik, % nisbət.	-9,98	-26,69	-21,35	-9,3	47,23

Cədvəl 3.

Neftin tərkibindən asılı olaraq XÜB-lərin təyini

Neft nümunəsi	XÜB-lərin faktiki alınmış miqdarlarının nəticələri, ppm				
	5 ppm	10 ppm	50 ppm	100 ppm	500 ppm
№1	3,08	7,35	61,24	40,30	1158,18
№2	4,03	9,66	47,74	93,05	596,17
№3	4,40	9,66	47,74	93,05	596,17
№4	3,98	7,78	44,08	94,42	382,47

Azərbaycanın müxtəlif model neftlərinə 100 ppm XÜB əlavə edilməklə aparılan təhlillər göstərmişdir ki, nəticələr neftlərin qatran, asfalten və parafin tərkibindən formalaşan faza quruluşlarından asılı olaraq dəyişir. XÜB-lərin operativ aşkarlanması üçün CHROMOS şirkətinin hazırladığı onlayn analizator boru kəmərlərində və nasos stansiyalarında real vaxtda monitoring imkanını təmin edir və sahə sınaqları laboratoriya üsullarından daha yüksək dəqiqlik nümayiş etdirir [9].

Cədvəl 4.

Tərkibinə 100 ppm XÜB əlavə edilmiş 28 may nefti ilə qarışdırılmış neftlərin təhlili.

Model neft nümunələri	Sıxlıq 20 °C, kq/m ³ ГОСТ 3900.	XÜB-lərin miqdarı, ppm×10 ⁻⁴ küt.% ASTMD 4929.	10/90- % nisbətində 100 ppm-li neft/təmiz neft XÜB-lərin miqdarı, ppm×10 ⁻⁴ küt.% ASTMD 4929.	Parafin kütlə % ГОСТ 11851.	Qətran, kütlə % Silkogelli qatran.	Asfaltenlər, kütlə % ГОСТ 11858.
28 may	856,0	100	-	1,91	12,80	0,76
Balaxanı	876,0	0,9	9,3	0,31	7,6	0,01
Buzovna	991,6	0,8	8,1	0,88	10,8	0,13
Suraxanı	848,8	0,7	11,8	1,71	1,7	<0,01
Yuxarı Qala	868,3	0,9	7,4	0,28	5,1	<0,01
Aşağı Qala	880,0	0,6	9,8	0,35	3,4	0,08
Bibi-Heybət	877,5	0,6	10,9	0,54	5,9	0,11

Bibi-Heybət parafinli	887,0	0,7	13,6	1,10	11,3	0,17
Binəqədi	902,7	0,5	8,7	0,68	9,1	0,08
Muradxanlı	876,8	0,6	14,6	5,71	18,3	4,82
Qaradağ parafinli	848,6	0,4	15,4	5,98	4,3	0,12
Qaradağ yağlı	904,0	0,7	11,3	1,34	9,7	0,02
Neft Daşları	887,0	0,4	9,7	1,65	11,6	0,54
Günəşli	861,0	0,9	10,1	0,43	6,8	0,59
Çıraq	862,5	0,8	10,4	0,38	5,7	1,9

Axın müddətində avtomatik olaraq neftdə mövcud olan XÜB-lərin 0,1 –10 ppm intervalında miqdarının təyin etmək imkanına malikdir (cədvəl-5).

Cədvəl 5.

CHROMOS-un təklif etdiyi üsulla XÜB-ləri avtomatik alına bilən nəticələri

Kompound Tərkibi	Həd (ppm)	Yüksək həd (ppm)
Karbon tetraxlorid	0,1 – 5	10
Xloroform	0,1 – 5	10
Dixlorometan	0,1 – 5	10
1,2-Dixloroetan	0,1 – 5	10
Trixloroetilen	0,1 – 5	10
Tetraxloretilen	0,1 – 5	10
1,1,1,2-Tetraxloroetan	0,1 – 5	10
1,1,2,2-Tetraxloretan	0,1 – 5	10
Pentaxloroetan	0,1 – 5	10
Heksaxloroetan	0,1 – 5	10

Dozalayıcı üsulla etibarlı ölçmə yalnız proses sabit temperatur və müəyyən olunmuş həcmdə aparıldıqda mümkündür; axınlı buxar fazalı nümunə götürmə zamanı isə komponentlərin tam tarazlığa keçməsi üçün vaxt çatmadığından dəqiq məlumat əldə etmək olmur və arbitraj analizləri üçün nöqtəvi toplum üsulu daha məqsədəuyğun hesab edilir [10]. Buxar fazalı analiz boru xəttində real vaxtda XÜB monitorinqinə imkan verir, korroziya riski yaradan hallar barədə operativ qərar verməyi təmin edir və qəbul-təhvil proseslərində XÜB mənbəyinin avtomatik identifikasiyasını mümkün edir. Onlayn xromatoqrafın kalibrlənməsinin avtomatik olması və ölçmələrin insan faktorundan asılı olmaması üsulu daha etibarlı edir və CHROMOS sisteminin laboratoriya analizlərinə nisbətən yüksək dəqiqlik və iqtisadi üstünlük göstərdiyi qeyd olunur [11]. Bununla belə, ilkin mərhələlərdə eyni cinsli neftlər üçün laboratoriya analizləri ilə paralel müqayisə tələb olunur və nəql zamanı yaranan problemlərin qarşısını almağın ən effektiv yollarından biri XÜB-lərin miqdarının düzgün monitorinqi və qrup tərkibinə uyğun seçilmiş kimyəvi reagentlərdən istifadədir [12].

Ədəbiyyat

- [1]. Хлор поставили на место // Российская газета. Спецвыпуск №159(7917), 2019.
- [2]. Зорина, С. «Газпром нефть» разрабатывает безопасную технологию производства алкилата // <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online/archive/2015-october/1109599/>
- [3]. ГОСТ Р 52247–2004. Нефть. Методы определения хлорорганических соединений.
- [4]. ГОСТ 33342–2015. Нефть. Методы определения органического хлора.
- [5]. Пат. 2745752 (РФ).

- [6]. Санникова, А. Л. Исследование факторов, влияющих на точность определения содержания органических хлоридов в нефти / А.Л.Санникова, О.С.Татьянина, С.Н.Судыкин [и др.] // Сборник научных трудов ТатНИПИнефть, –2016, –с.237–241.
- [7]. Синёв, А.В. Образование легколетучих хлорорганических соединений при первичной перегонке нефти в результате разложения химических реагентов, содержащих соли четвертичных аммониевых соединений / А.В.Синёв, Т.В.Девяшин, А.М.Кунакова [и др.] // ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти, №4(14), –2019, –с.63–69.
- [8]. Сафина, И.Р. Применение метода SARA-анализа для характеристики нефтяных дисперсных систем / И.Р.Сафина, Д.А.Ибрагимова, Э.А.Яушев [и др.] // Вестник Казанского технологического университета, №24, –2014, –с.212–213.
- [9]. Коренев, В.В. Определение хлорорганических соединений в нефтях различного состава хроматографическим методом с использованием парофазного пробоотборного устройства / В.В.Коренев, О.В.Жданеев, В.П.Ломин [и др.] // Технологии нефти и газа, №5, –2021, –с.53–58.
- [10]. Nurullayev, V.X. Xlor üzvi birləşmələrin Azərbaycan neftlərinin keyfiyyətinə təsirinin tədqiqi / V.X.Nurullayev, B.T.Usubəliyev // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, №3, –2020, s.64–72.
- [11]. Nurullayev, V.X. Neftlərin nəqli zamanı xlor üzvi birləşmələrə nəzarətin aparılmasının zəruriliyi / V.X.Nurullayev, H.R.Qurbanov, A.V.Qasimzadə // Azərbaycan neft təsərrüfatı, №11, –2020, –s.49–54.
- [12]. Левченко, Д.Н. Необходимость удаления из нефти коррозионноагрессивных солей // Химия и технология топлив и масел, №6, –1981, –с.43–44.

Summary

The importance of proper application of measuring instruments and equipment used in the determination of organochlorine compounds during the transportation of oils.

Nurullayev V.H., Gurbanov G.R., Gasimzade A.V., Aliyeva G.M.

Keywords: *organochlorine compounds, hydrotreating, reforming, potentiometric titration, microcoulometer, X-ray fluorescence, chromatography*

The article examines oils containing organic chlorine compounds (OCCs), which are a major cause of corrosion during transportation and processing, and whose excess levels pose significant production, economic, and environmental risks. Modern approaches for managing OCCs, identifying their origin, implementing mitigation strategies, and ensuring proper monitoring are proposed. Studies on model oils (paraffinic, asphaltene–naphthenic, and tar-containing) using gas chromatography with a vapor-phase sampler demonstrate that OCCs can be reliably and rapidly detected regardless of oil type or composition. Proper application of this method enables timely prevention of contaminated oil entering pipelines and refineries.

Резюме

Важность правильного применения измерительных приборов и оборудования, используемых при определении хлорорганических соединений при транспортировке нефти.

Нуруллаев В. Х. Гурбанов Г. Р., Гасымзаде А. В., Алиева Г. М.

Ключевые слова: *хлорорганические соединения, гидроочистка, риформинг, потенциометрическое титрование, микрокулометрия, рентгенофлуоресценция, хроматография*

Статья посвящена проблеме коррозии, возникающей при транспортировке и переработке нефти, содержащей хлорорганические соединения (ХОС), которые при превышении норм создают производственные, экономические и экологические риски. В работе предложены современные подходы к управлению ХОС, анализу их происхождения, снижению их содержания и организации эффективного мониторинга. Исследования, выполненные на модельных нефтях (парафинистых, асфальтено-нафтеновых и смолосодержащих) методом газовой хроматографии с использованием парофазного пробоотборника, показали возможность определения ХОС независимо от типа и состава нефти, а также их экспрессного обнаружения. Корректное применение метода позволяет своевременно предотвращать попадание загрязнённой нефти в трубопроводы и на нефтеперерабатывающие заводы.

UOT 541.

DOI 10.54758/16801245_2026_26_1_28

Yaşıl kimyanın klassik üzvi reaksiyalardakı mövcud problemlərin həllində rolu və perspektivləri

¹Mustafayev Musa Musa oğlu ORCID 0000-0002-2418-8031

²Şahgəldiyev Fizuli Xanəli oğlu ORCID 0009-0003-7444-8801

³İsmayılova Raisə İspəndiyar qızı ORCID 0000-0003-2506

⁴Məmmədova Aynur Alim qızı ORCID 0000-0002-3596-1552

⁵Əhmədov Vəlyəddin Nüsrət oğlu ORCID 0009-0003-4075-3747

Sumqayıt Dövlət Universiteti, Sumqayıt, Azərbaycan. 1, 4-dosent, 2-baş müəllim, 5-k.f.d., müəllim, Polimer Materialları İnstitutu, Sumqayıt, Azərbaycan, 3-k.f.d., aparıcı elmi işçi
shahgeldiyevf@gmail.com, aynur.mammadova@sdu.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT

Məqalənin tarixçəsi

Daxilolma tarixi: 15.01.2026

Düzəliş tarixi: 06.02.2026

Qəbulolunma tarixi: 03.03.2026

Açar sözlər

klassik üzvi reaksiyalar, yaşıl kimya və onun 12 prinsipi, atom iqtisadiyyatı, E-amili, ion mayeləri, ultrasəs süalandırılması

XÜLASƏ

Təqdim olunan məqalə klassik fundamental üzvi reaksiyalardakı problemlər, onların araşdırılması və yaşıl kimya prinsiplərinin tətbiq edilməsi ilə mövcud problemlərin aradan qaldırılmasına həsr olunmuşdur. Kimyəvi məhsulların və proseslərin layihələndirilməsində yaşıl kimyanın istifadə edilə bilən müxtəlif prinsiplərindən istifadə olunması-tullantıların azaldılması, enerjiyə qənaət edilməsi və daha təhlükəsiz maddələrin (həllədicilər) axtarılması üçün səmərəli və innovativ yollar təklif edir və bununlada iqtisadiyyata, cəmiyyətə və biosferə fayda verir və qoruyur.

Bu prinsiplər daha dayanıqlı inkişafı təmin edir və ya bərpa olunan xammaldan istifadə və məhsulun istismar müddəti və ya son utilizasiyası üçün layihələndirmə kimi məsələləri əhatə edir

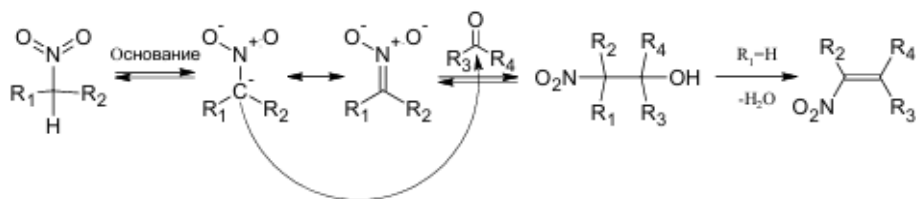
Amerikalı alim Pol Anastas “yaşıl kimya” konsepsiyasını (terminini) ilk dəfə 1991-ci ildə elm və sənaye dünyasına (ABŞ Ətraf Mühitin Mühafizəsi Agentliyi) daxil etmişdir. Bu konsepsiyanın elmə daxil edilməsi Yaşıl Kimya Proqramının başlanması ilə irəli sürülmüşdür. Kimyanın ətraf mühitə təsirini azaltmaqla bərabər öz yaxşı niyyətlərini saxlamağa imkan vermək üçün iki alim Anastas və Varner 1998-ci ildə “Yaşıl Kimya: Nəzəriyyə və Təcrübə” kitabını nəşr etdirmiş və bununla da, “yaşıl kimyanın on iki prinsipi”nin formalaşmasına nail olunmuşdur.

Bu elm sahəsinin cavan olmasına baxmayaraq, onun prinsiplərinin üzvi kimyanın geniş aspektdə məlum olan klassik reaksiyalarında tətbiq olunması, reaksiya şəraitlərinin yaxşılaşdırılmasına, prosesin ekoloji təmiz şəraitdə aparılmasına, alınan məqsəddəli məhsulun atom səmərəliliyinə səbəb olur [1].

Məhz bu sadalananlara daha da aydınlıq gətirmək üçün konkret bir neçə nümunələri nəzərdən küçürək.

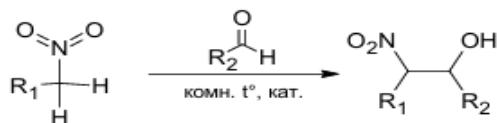
I. Anri reaksiyası: Reaksiyanın yerinə yetirilməsi və alınan nəticələrə əsasən, məhz bu prosesin, yaşıl kimyanın 1,2 və 9-cu prinsiplərinin tələblərinə cavab verdiyi müşahidə olunur.

Bu reaksiya nitroalkenlər şəklində yan məhsulların alınması ilə nitrometan və aldehid arasında gedən aldol tipli β-hidroksinitrobirləşmələrin sintezi reaksiyasıdır.



Anri reaksiyasının mexanizmi

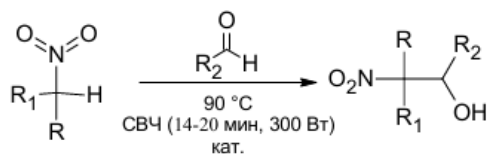
Yaşıl kimya prinsiplərinin əsas götürülməsi ilə β-hidroksinitro birləşmələrin Anri metodu üzrə sintezi reaksiyasının aparılması təklifi Kalyani Rackumar və b. tərəfindən verilmişdir. Bu reaksiyanın aparılmasında müəlliflər banan qabığıının kəskin (tünd) külündən katalizator kimi istifadə etmiş və yüksək göstəricilərə malik nəticələr əldə etmişlər.



Anri reaksiyası, R₁- alkil qrupu, R₂-alkil və ya aril qrupudur, katalizator- banan qabığıının külüdür.

Komponentlərin katalizatorla ən yaxşı nisbətlərinin, yəni aldehid və nitroalkanın ekvimolyar nisbətləri zamanı məhsulun çıxımı 98% təşkil etmişdir. Reaksiyanın gedişində yan məhsullar alınmır, bu atom səmərəliliyinin (AS) 100%, E-amilinin isə 0,115 alınmasına imkan verir. Reaksiya həlledici iştirak etmədən gedir və əlavə enerji sərfi tələb olunmur.

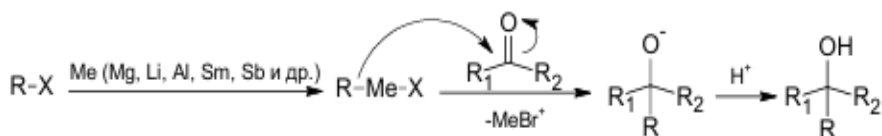
2018-ci ildə Abdellattif, Moxtarin işində, katalizator kimi alüminium təbəqəli ikili hidrokisidlərin istifadə olunması zamanı, həddən artıq yüksək tezlikli (HAYT) şüalanmanın Anri reaksiyasının gedişinə müsbət təsiri nümayiş etdirilmişdir [1,2].



Anri reaksiyalarında HAYT şüalandırma, katalizator (alüminium təbəqəli ikili hidrokisidlər)

Məhsulun hesablanmış çıxımı, məhz HAYT şüalandırmanın istifadəsi zamanı 98% təşkil etmişdir. Oxşar nəticələrə, HAYT şüalandırma sistemlərində katalizator kimi ultrasəs təsirinin (US) istifadəsi zamanı da nail olunur.

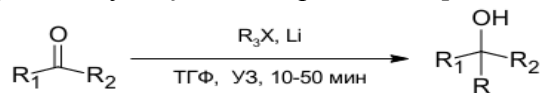
II. Barbye reaksiyası: Metalüzvi reagentin ketonla qarşılıqlı təsir reaksiyasından uyğun spirtin alınması Barbye reaksiyası kimi məşhurdur. Barbye tərəfindən kəşf edilmiş orjinal proses mübahisəsiz bir sıra üstünlüklərə malik olsa da, amma bəzi çatışmayan cəhətlər də mövcuddur. Məsələn, prosesin gedişində “in situ” (substratın iştirakında) metalüzvi reagentin hazırlanması tələb olunur ki, bu da prosesin aparılmasında çətinlik törədir, belə ki, metalüzvi aralıq məhsul suya qarşı çox həssasdır, reaksiya qabiliyyətlidir. Bu kimi səbəblərə görə Barbye reaksiyası başlanğıc olaraq susuz həlledicilərdə yerinə yetirilmişdir. Reaksiyanı yalnız yüksək reaksiya qabiliyyətli alkilhalogenidlərlə aparmaq olar. Barbye reaksiyası tsiklopentanonun sintezinin daha mühüm kimyəvi proseslərindən biridir.



Barbye reaksiyasının prinsipial sxemi. X-halogen. Me –metal

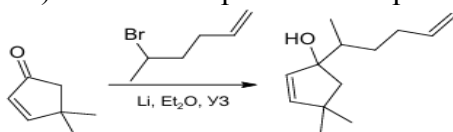
Yaşıl kimyanın–enerjiyə qənaət 6-cı prinsipinin II-istiqlamətini nəzərə alaraq, Barbye reaksiyasının modelləşdirilməsi sahəsindəki ilk addımlar, maqneziumun litiumla əvəz edilməsi

olmuşdur, lakin əldə olunan nailiyyəti isə prosesin ultrasəsə (US) birbaşa intensivləşdirilməsinin nəticəsi saymaq olar. Ultrasəsin tətbiqi ilə Barbye reaksiyası üzrə mühüm kimyəvi komponentlərin sintezi əhəmiyyətli üstünlüklərə malikdir, belə ki, reaksiya kommersiya baxımından əl çatan olan tetrahidrofuranda (THF) aparıla bilər və reaksiyanın gedişində reduksiya və enollaşma kimi əlavə proseslər müşahidə olunmur. Allil- və ya benzilhalogenidlərin iştirakı ilə həyata keçirilən bu reaksiyalar daha yaxşı çıxımlarla >95 % nəticələnir. Li/THF/US-in istifadə olunması ilə modifikasiya olunmuş Barbye reaksiyası şəkildə təqdim edilir [3-5].



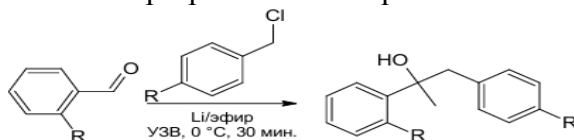
US-in iştirakı ilə Barbye reaksiyası, X-halogendir

Analoji yolla və yaxşı çıxımla (70%) dimetilsiklopentenondan pentalen turşusunu almaq olar.



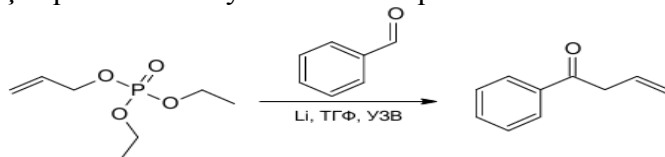
US-in köməyi ilə pentalen turşusunun Barbye reaksiyası üzrə sintezi

Eləcə də, alkilbenzalhid və alkilxlorometilbenzoldan 30 dəq. müddətində, 0 °C-də Barbye reaksiyası üzrə 70% çıxımla alkilfenilpropanolları almaq mümkündür.



US istifadəsi ilə alkilfenilpropanolların Barbye reaksiyası üzrə sintezi

Fenilbutenonu otaq temperaturunda, 3 dəq. müddətində, 85%-li çıxımla benzalhidin dietilpropenilfosfatla qarşılıqlı təsir reaksiyasından almaq olar.

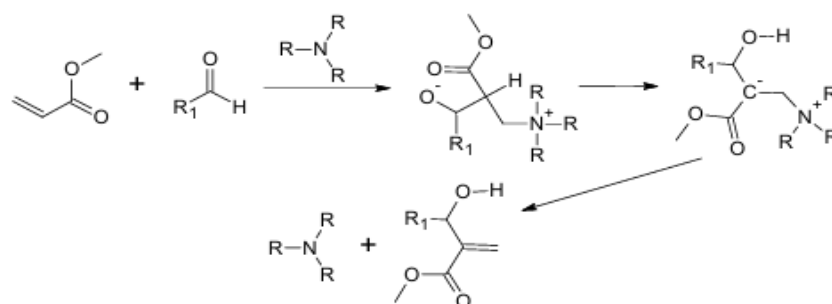


US istifadəsi ilə fenilbutenonun Barbye reaksiyası üzrə sintezi

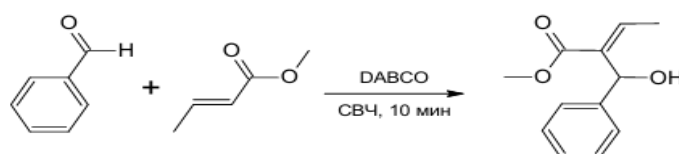
III. Beylis-Xillman reaksiyası: Aldehidlərin akrilatlarla təsir reaksiyaları nəticəsində α - (hidroksilalkil) akrilatların və ya vinilketonlarla α - (hidroksilalkil) vinilketonların alınmasında C-C rabitəsinin əmələ gəlməsi Beylis-Xillman reaksiyası kimi məlumdur.

Hal hazırda Beylis-Xillman reaksiyası mexanizminin dəqiqləşdirilməsi müzakirə mövzusu olaraq qalmaqdadır. Bu səbəbə görə reaksiya mexanizminin 1983-cü ildə Hoffman tərəfindən təklif olunmuş sadələşdirilmiş sxeminin verilməsi daha məqsədəuyğundur. Hoffman tərəfindən təklif olunmuş reaksiya modelində, reaksiya üçlü- amin iştirakında aktivləşdirilmiş alkenin iştirakı ilə aldol kondensləşməsi ilə başlayır. Alınan ion intermediatı sivitter- reaksiyanın gedişində sonralar siqmatrop yenidən qruplaşmaya məruz qalır ki, bu da prosesdə katalizator rolunu oynayan üçlü- aminin ayrılması ilə yekunlaşır [3].

Beylis-Xillman reaksiyası üzrə sintezin aparılması üçün optimal kondensləşmənin axtarılması prosesinin əhəmiyyətli uğuruna, DABCO ilə katalizə edilən benzalhidin metilkrotonatla aparılması reaksiyasında HAYT şüalandırmanın prosesə müsbət təsiri nəticəsində nail olunur. Bu halda son məhsul yüksək çıxımla, 10 dəq. müddətində alınır.

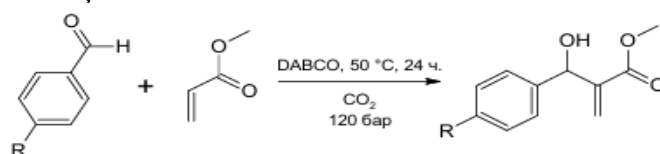


Beylis-Xillman reaksiyasının prinsipial sxemi



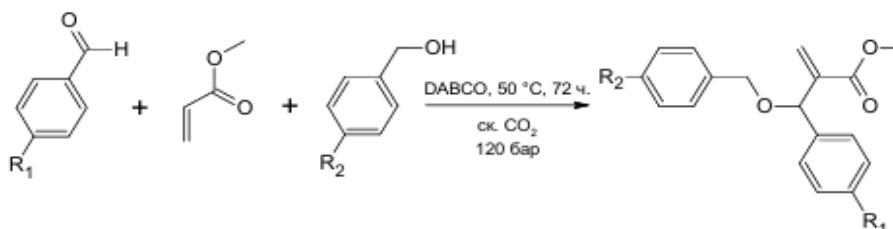
HAYT–şüalandırılmasının istifadəsi ilə Beylis-Xillman reaksiyası

Beylis-Xillman reaksiyası, həm də superkritik CO₂-də reaksiyanın yüksək konversiya və sürət göstəriciləri ilə aparılmışdır.



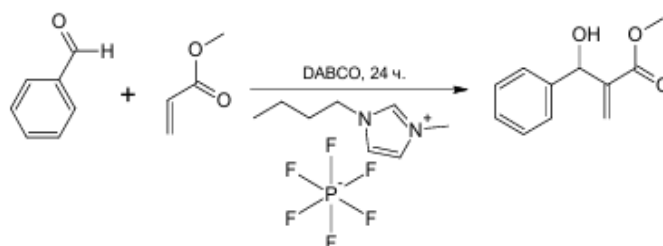
Superkritik haldakı CO₂-də Beylis-Xillman reaksiyası

Yuxarıda təsvir edilən reaksiyanın spirt iştirakında aparılması zamanı, yalnız superkritik CO₂ şəraitlərində gedən və üçkomponentli birləşmə nəticəsində əmələgələn əsas məhsul efirdən ibarət olur.



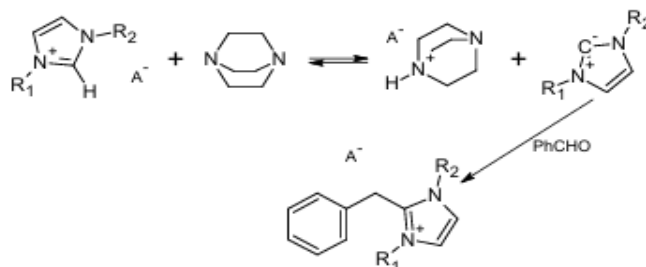
Superkritik haldakı CO₂-də üçkomponentli Beylis-Xillman reaksiyası

Beylis-Xillman reaksiyasının modelləşdirilməsinə yanaşmalardan biri isə sintez reaksiyalarının yaşıl kimyanın 5-ci prinsipinə uyğun olaraq, yaşıl həlledicilər - ion mayeləri mühitində (İM) aparılmasıdır. Müşahidə edilmişdir ki, reaksiyanın həyata keçirilməsi zamanı həlledici kimi asetonitrilin heksaflüorofosfat 1-butil-3-metilimidazolla əvəz edilməsi, DABCO ilə katalizə olunan benzaldehydin netilakrilatla reaksiyasının sürətinin 33 dəfə intensivləşməsinə gətirir, lakin bu zaman son məhsulun çıxımı nəzərə çarpacaq dərəcədə aşağı düşür [2-5].



İon mayesi mühitində Beylis-Xillman reaksiyası

Lakin tez bir zamanda aparılan təhlillər çıxımın aşağı düşmə səbəbini aydınlaşdırmağa imkan verdi və bu çatışmazlığın aradan qaldırılmasının həll edilməsi yolu tapıldı, bu isə Beylis-Xillman reaksiyası üzrə sintez prosesində tamamilə yaşıl həlledicilərdən (İM) istifadə olunmasını ortaya qoydu. Məlum oldu ki, əsasi mühitlərdə aldehid imidazol kationu ilə qarşılıqlı təsirdə olarkən sərf olunur, bu imidazol halqasının ikinci vəziyyətindəki protonun yüksək hərəkətliliyi sayəsində baş verir.

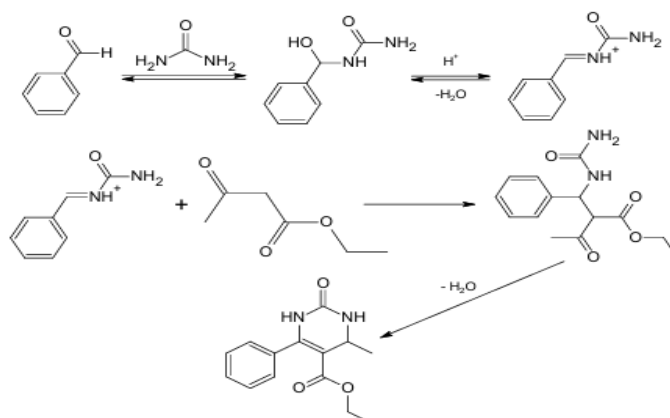


Beylis-Xillman reaksiyası üzrə sintez prosesində İM-nin imidazol kationunun əlavə reaksiyası

Alınan nəticələrin əsasında qərara alınmışdır ki, inert həlledici kimi İM-nin istifadəsi zamanı ehtiyatlılığa riayət olunması mütləq şərtlərdəndir.

İmidazol tsiklinin ikinci vəziyyətindəki protonuna görə, pK_a göstəricisinin kifayət qədər aşağı olması və reaksiyada əlavə məhsulun əmələgəlməsi səbəbi nəticəsində çıxımların aşağı alınması problemini aradan qaldırmaq məqsədilə, ikinci vəziyyətdə əvəz edilmiş imidazol ion mayelərindən istifadə edilməsi təklif olunur. Beləliklə, identifikasiya olunmuşdur ki, müxtəlif aldehidlər və metilakrilat arasında Beylis-Xillman reaksiyası, məsələn, heksaflüorfosfat 1-butil-2-metil-3-imidazolda olduğu kimi yaxşı gedir. Eləcədə, bu reaksiya əsasi nühiyə qarşı davamlı və kationu ikinci vəziyyətdə fenil- qrupu saxlayan imidazol ion mayeləri iştirakında uğurla aparılmışdır [4-6].

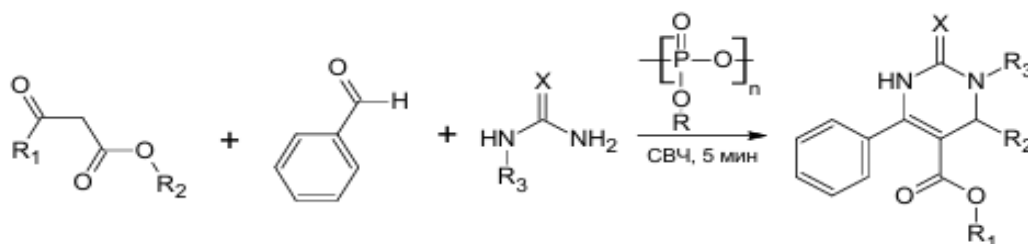
IV. Bidjinelli reaksiyası: Bidjinelli reaksiyası çox komponentli kimyəvi reaksiyadır, reaksiyanın gedişi nəticəsində asetat sirkə efiri, aril- aldehidi (məsələn, benzaldehid) və karbamiddən dihidropirimidinonlar alınır. Dihidropirimidinonlar, Bidjinelli reaksiyasının məhsullarıdır, əczaçılıq sənayesində kalsium kanallarının bloklaşdırıcıları və s. kimi geniş istifadə olunur.



Bidjinelli reaksiyasının mexanizmi

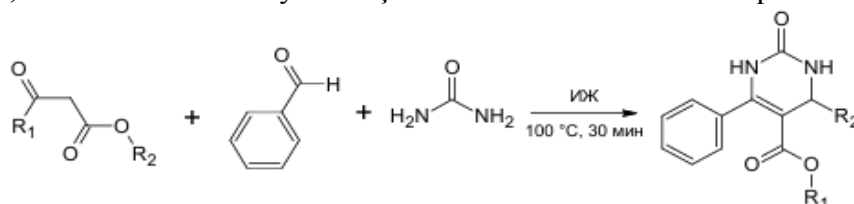
Bidjinelli reaksiyasının mexanizmi dihidropirimidinonların alınmasına gətirən bimolekulyar reaksiyalar seriyasından ibarətdir. Bu mexanizm 1973-cü ildə Svit tərəfindən təklif edilmiş, 1997-ci ildə isə Kappe tərəfindən tam dəqiqləşdirilmişdir, mexanizm bütün reaksiyanın sürətini müəyyən edən, karbamidin aldehidə nukleofil birləşməsi mərhələsindən başlayır. Onun arxasınca imin-intermediatı əmələ gətirən turşu katalizi mərhələsi gəlir, bu mərhələdə əmələ gələn intermediat imin- rabitəsi üzrə asetosirkə efiri ilə reaksiyaya girir. Yekun mərhələdə karbonil qrupu üzrə amin

qrupunun birbaşa nukleofil həmləsi ilə tsiklin kondensləşmə qapanması baş verir, nəticədə bir molekul su ayrılır [3,6]. Yaşıl kimyanın prinsiplərini 5,9 nəzərə almaqla, Bidjinelli reaksiyasının, şəraitinin optimallaşdırılması yollarının axtarılması istiqamətində atılan addımlar göstərir ki, reaksiya sisteminə həddən artıq yüksək tezlikli (HAYT) şüalandırma təsiri prosesin təkmilləşdirilməsinə nail olunmasına imkan verir. Nümayiş etdirilmişdir ki, β -ketoefirlərin, benzaldehydin və karbamidin qarışığı həddən artıq yüksək tezlikli (HAYT) şüalandırma təsiri altında 1-5 dəq. müddətində polifosfat efiri iştirakında 61-95%-li çıxımla dihidropirimidinonların alınmasına gətirir.



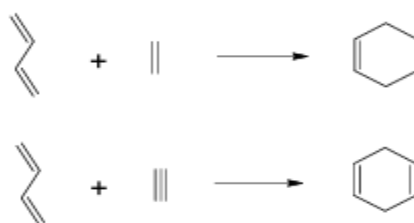
HAYT-şüalandırmanın istifadə edilməsi ilə Bidjinelli reaksiyası

Həddən artıq yüksək tezlikli (HAYT) şüalandırmanın təsiri ilə yanaşı, əvvəlki hallarda olduğu kimi nümayiş etdirilmişdir ki, Bidjinelli reaksiyası tetraflüorborat və ya heksaflüorofosfat 1-butil-3-metilimidazol İM-nin iştirakında yaxşı gedir. Belə hallarda, ənənəvi üzvi həlledicilərdən istifadə etmədən, son məhsulun daha yüksək çıxımla alınmasına nail olmaq mümkündür [5].



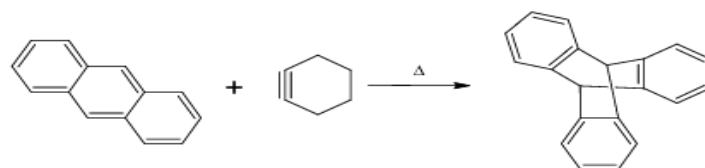
İM-nin iştirakında Bidjinelli reaksiyası

V. Dils-Alder reaksiyası: Dils-Alder reaksiyası C-C rabitəsinin əmələ gəlməsi ilə nəticələnən tipik reaksiyadır. Bu reaksiya, adduktların əmələgəlməsi nəticələnən dienofil (2π -elektron sistemi) adlanan ikili- və ya üçlü- rabitəyə malik əlaqəli dienlər və birləşmələrlə tsiklobirləşmə reaksiyasıdır. Bu reaksiyanın klassik nümunəsi, butadienlə (dien) etilen (dienofil) arasında, hər iki komponentin ayrı-ayrılıqda və ya inert həlledicidə qızdırılması zamanı baş verən qarşılıqlı təsirdən ibarətdir. Qeyd edək ki, dienofil kimi etilenin əvəzinə asetilen də istifadə edilə bilər. Dils-Alder reaksiyasında ilkin materiallardakı iki π -rabitəsi hesabına iki yeni σ -rabitəsi əmələ gəlir.



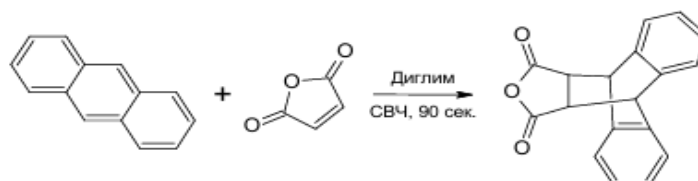
Dils-Alder reaksiyası

Mütləq şərt deyildir ki, dienlər yalnız atsiklik karbohidrogenlər olsunlar, bu reaksiyalarda bəzi heterotsiklik və ya bəzi aromatik birləşmələr də iştirak edə bilərlər. Hazırkı reaksiyaya aromatik birləşmələr içərisindən antrasen çox asanlıqla daxil olur.



Antrasen və arinin iştirakı ilə Dils-Alder reaksiyası

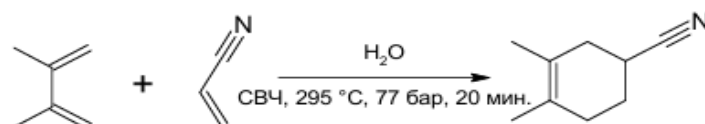
Dils-Alder reaksiyasının həddən artıq yüksək tezlikli (HAYT) şüalandırmanın təsiri ilə aparılması da əlverişli şəraitlərdən sayılır. Beləki, antrasen və malein anhidridi diqlim iştirakında həddən artıq yüksək tezlikli (HAYT) şüalandırmanın təsiri altında 80% çıxımla addukt əmələ gətirirlər. Həmin çıxımla 90 dəq müddətində qaynatmaqla gedən reaksiya ilə müqayisədə, təklif edilən bu reaksiya 90 san ərzində baş verir.



HAYT-şüalandırmanın istifadə edilməsi ilə Dils-Alder reaksiyası

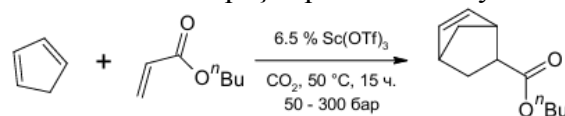
Analoji olaraq -HAYT-şüalandırmanın istifadə edilməsi ilə antrasen ksilolda 10 dəq. müddətində dimetilfumaratla qarşılıqlı təsirdə olur və nəticədə 87%-lə son məhsul alınır, lakin ənənəvi qızdırılma yolu ilə 5 saat müddətində çıxım 67% təşkil edir.

Dils-Alder reaksiyasının superkritik su mühitində aparılması nümunələri də məlumdur. Yaşıl kimya yanaşmasından 65%-li çıxımla 2-metiltsikloheksen 1-karbonitrilin superkritik su mühitində (2,5,6-ci prinsip)HAYT-şüalandırmanın istifadə edilməsi ilə alınması müəyyən maraq doğurur.



Superkritik su mühitində HAYT-şüalandırmanın təsiri altında Dils-Alder reaksiyası

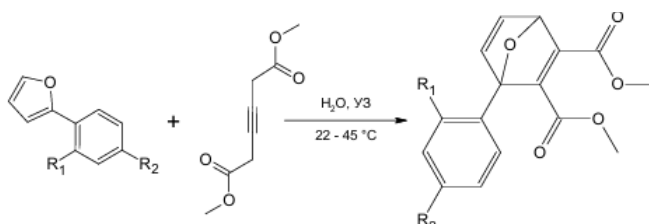
Dils-Alder reaksiyası üzrə birləşmələrin sintezində superkritik halda olan CO₂-dən də istifadə etmək mümkündür. Bu istiqamətdə aparılan işlərin uğurlu nəticələrindən biri Lyuis turşuları məsələn, triflüormetansulfonatla kataliz şəraitində alınan nəticələrdir. Sxemdə superkritik CO₂ şəraitində tsiklopentadienin n-butilakrilatla qarşılıqlı təsir reaksiyasının gedişi verilmişdir.



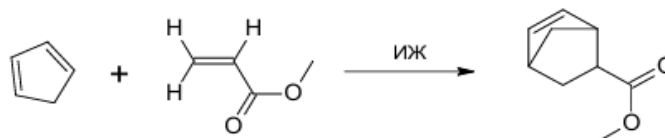
Superkritik CO₂ halında Dils-Alder reaksiyası

Bəzi hallarda Dils-Alder reaksiyasında məhsulun çıxımının artırılmasına ultra səsin (US) istifadə olunması ilə də nail olmaq olar. Məsələn, reaksiyanın ilkin komponentlərinin - əvəzlənmiş furanlar və dimetilasetilendikarboksilatın suda cüzi temperaturdakı US-emalı son məhsulun 99-100%-li çıxımla alınmasına imkan verir.

Dils-Alder reaksiyasında tsiklopentadien və metilakrilat arasında gedən reaksiyada tetraflüorborat və ya perxlorat 1-butyl-3-metilimidazol, triflüormetansulfonat və ya heksaflüorfosfat 1-etil-3-metilimidazol kimi ion mayələrinin (İM) istifadə olunması reaksiya sürətinin və son məhsulun çıxımının yüksəlməsinə səbəb olur [4].



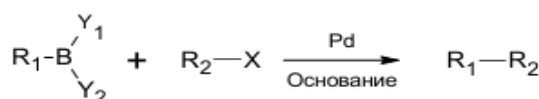
Dils-Alder reaksiyasında (US) istifadə olunması



İM-mühitində Dils-Alder reaksiyası

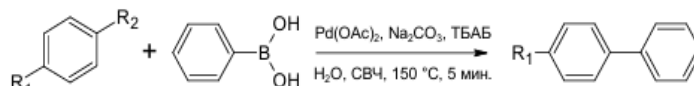
VI. Suzuki reaksiyası: Suzuki reaksiyası palladium kompleksləri ilə katalizə olunan, aril- və vinilbor turşularının aril- və ya vinilhalogenidlərlə üzvi reaksiyadır. Suzuki reaksiyası preparativ üzvi kimyada poliolefinlərin, stirolların, həm də əvəzlənmiş bifenillərin alınmasında geniş istifadə olunur [17,19].

Suzuki reaksiyasının müxanizmi, Pd(O) komplekslərinin iştirakı ilə katalitik proseslərin çevrilmələri üçün xarakterikdir, reaksiyanın ümumi sxemi belədir.



Suzuki reaksiyasının ümumi sxemi

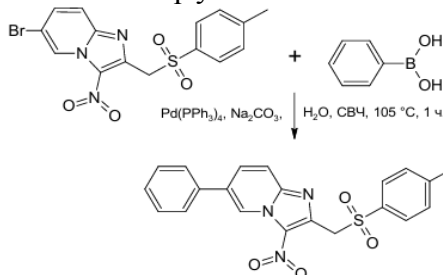
Biarilin bir sıra törəmələri, müxtəlif arilhalogenidlərin su mühitində həddən artıq yüksək tezlikli şüalandırılmasının (HAYT) istifadə edilməsi ilə fenilbor turşusu ilə reaksiyasından alınmışdır.



HAYT şüalandırmanın tətbiqi ilə Suzuki reaksiyası

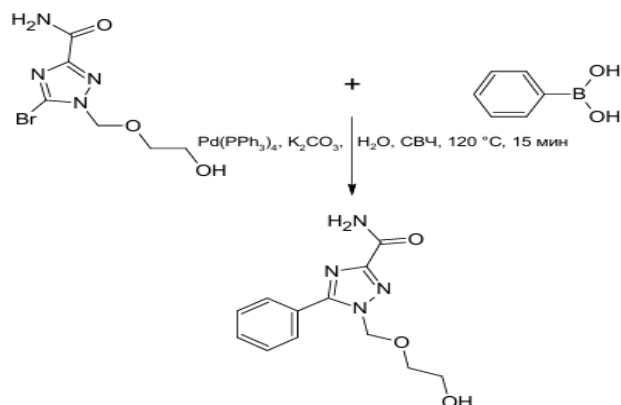
Maraqlıdır ki, yuxarıda təsvir olunan texnologiya arilbromidlərin və arilyodidlərin iştirakında daha yaxşı çıxımlar əldə etməyə şərait yaradır, lakin arilxlorid halında çıxım aşağı olur. Bu problem reaksiyanın arilxlorid və fenilbor turşusunun palladium komplekslərinin su mühitində istifadəsi, eləcə də eyni vaxtda yüksək tezlikli şüalandırma ilə soyutma və qızdırılma metodunun tətbiqi ilə aradan qaldırılır.

Suzuki reaksiyası üzrə heterotsiklik birləşmələrin sintezində mühüm aspekt kimi HAYT şüalandırmasını əsas götürmək olar. İmidazopiridinlərin arilbor turşusu ilə su mühitində mikridalğalı təsirindəki reaksiyası, ənənəvi texnologiyaların istifadəsi ilə verilmiş parametrlərə qədər temperaturunun artırılması halı ilə müqayisədə daha effektiv gedir.



HAYT şüalandırmanın tətbiqi ilə Suzuki reaksiyası

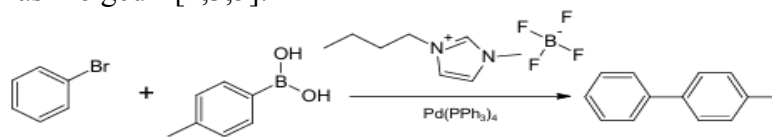
Suzuki reaksiyası üzrə HAYT şüalandırması təsiri altında ariltriazolasilnukleozidlərin sintezi prosesini həyata keçirmək olar. Bu birləşmələr müxtəlif virus xəstəliklərinə qarşı potensial vasitələr hesab olunur, qeyd olunan metodika üzrə, 5-ariltriazolasilnukleozidlərin bir mərhələli sintezini effektiv şəkildə yerinə yetirmək olar.



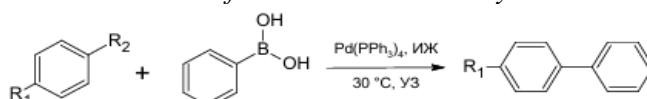
Suzuki reaksiyası üzrə HAYT şüalandırması təsiri altında ariltriazolasilnukleozidlərin sintezi

Arilhalogenidlərlə arilbor turşuları arasındakı reaksiyada, su mühitində HAYT şüalandırılmasının təsiri zamanı, benzotiazol əsəsindəki Pd(II) komplekslərinin bu reaksiya üçün daha effektiv katalizatorlar olması müşahidə olunmuşdur. Bu kompleks birləşmələrin katalitik fəallığı ilə əlaqədar dövr saylarının yüksək olması, onların kütləvi istehsalı üçün çox vacibdir.

Digər yaşıl metodlarla kimya sənayesinə lazım olan birləşmələrin sintezinin Suzuki reaksiyası üzrə aparılmasında, İM-dən istifadə edilməsi (5,6,8 prinsip) daha səmərəli ola bilər. Buna, π -metilbifenilin brombenzol və tolibor turşusundan sintezi, həm də əvəzlənmiş bifenillərin arilhalogenidlər və fenilbor turşusundan sintezinin US-təsiri altında və spirtin az miqdarının qarışığında İM-nin istifadəsi ilə aparılan reaksiya gözəl nümunə ola bilər. Hər iki reaksiya çıxımın 90%-dən artıq alınması ilə gedir [2,3,5].



İM-nin istifadəsi ilə Suzuki reaksiyası



İM- və US-in istifadəsi ilə Suzuki reaksiyası

Nəticə. Yuxarıda təsvir olunan klassik üzvi sintez reaksiyalarının yaşıl kimya prinsipləri yanaşmasından gedişi və optimallaşdırılması yollarının axtarılması, onu deməyə əsas verir ki, reaksiya proseslərinin modelləşdirilməsinin əsas məqamları, reaksiyanın sürətləndirilməsi üçün US-dən, daha enerji effektivliyi (enerjiyə qənaət) üçün, ənənəvi termiki metodlardan fərqli olaraq HAYT, alternativ reaksiya mühiti kimi yaşıl həlledici olaraq İM-dən istifadə olunmasından ibarətdir.

Ədəbiyyat

- [1]. Атласкин, А.А. Зелёная химия как инструмент устойчивого развития : учебное пособие / А.А.Атласкин, М.Е.Атласкина, А.В.Воротынцев [и др.] – М.: Неправительственный экологический фонд имени В.И. Вернадского, –2024. – 292 с.
- [2]. Bai, L. Rapid microwave-promoted Suzuki cross coupling reaction in water / L.Bai, J.-X.Wang, Y.Zhang // Green Chemistry. –2003. Vol. 5. –p. 615–617.

- [3]. Basavaiah, D. Recent Advances in the Baylis–Hillman Reaction and Applications / D.Basavaiah, A.J.Rao, T.Satyanarayana // Chemical Reviews. –2003. Vol. 103. –p. 811–892.
- [4]. Earle, M.J. Diels–Alder reactions in ionic liquids. A safe recyclable alternative to lithium perchlorate–diethyl ether mixtures / M.J.Earle, P.B.McCormac, K.R.Seddon // Green Chemistry. –1999. Vol. 1. –p. 23–25.
- [5]. Leadbeater, N.E. Ionic liquids as reagents and solvents in conjunction with microwave heating: Rapid synthesis of alkyl halides from alcohols and nitriles from aryl halides / N.E.Leadbeater, H.M.Torenus, H.Tye // Tetrahedron. –2003a. Vol. 59. –p. 2253–2258.
- [6]. Rajagopal, R. Ultrasound promoted Suzuki cross-coupling reactions in ionic liquid at ambient conditions / R.Rajagopal, D.V.Jarikote, K.V.Srinivasan // Chemical Communications. –2002. Iss. 6. –p. 616–617.

Summary

The role and prospects of green chemistry in solving existing problems of classical organic reaction

Mustafayev M.M., Şahgəldiyev F.X., İsmayılova R.İ., Mammadova A.A., Ahmadov V.N.

Keywords: *classical organic reactions, green chemistry and its 12 principles, atomic economics, E-factor, ionic liquids, ultrasonic radiation*

The presented article is devoted to the problems of classical fundamental organic reactions, their study and elimination of existing problems by applying the principles of green chemistry. The application of various principles of "green chemistry" in the development of chemical products and processes opens up effective and innovative ways to reduce waste, save energy and find safer substances (solvents), which benefits and protects the economy, society and the biosphere.

These principles promote more sustainable development or cover issues such as the use of renewable raw materials and designing for a product's lifespan or its final disposal.

Резюме

Роль и перспективы зеленой химии в решении существующих проблем классических органических реакций

Мустафьев М.М., Шахгельдиев Ф. Х., Исмаилова Р.И., Маммадова А.А., Ахмедов В.Н.

Ключевые слова: *классические органические реакции, зеленая химия и ее 12 принципов, атомная экономика, E- фактор, ионные жидкости, ультразвуковое излучения*

Представленная статья посвящена проблемам классических фундаментальных органических реакций, их исследованию и устранению существующих проблем путем применения принципов зеленой химии. Применение различных принципов «зеленой химии» при разработке химических продуктов и процессов открывает эффективные и инновационные пути сокращения отходов, экономии энергии и поиска более безопасных веществ (растворителей), что приносит пользу и защищает экономику, общество и биосферу.

Эти принципы обеспечивают более устойчивое развитие или охватывают такие вопросы, как использование возобновляемого сырья и проектирование с учетом срока службы продукта или его окончательной утилизации.

Kimyəvi kinetikanın fenomenoloji kinetikasının müasir vəziyyətiCavadova Samirə Nəsim qızı ^{ORCID} 0009-0008-1270-1724*Sumqayıt Dövlət Universiteti, Sumqayıt, Azərbaycan, müəllim*
samira.cavadova@sdu.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p>Məqalənin tarixçəsi Daxilolma tarixi: 20.11.2025 Düzəliş tarixi: 28.01.2026 Qəbulolunma tarixi: 24.02.2026</p>	<p>Məqalədə kimyəvi kinetikanın mühüm sahələrindən biri olan fenomenoloji kinetikanın elmi əsasları, müasir inkişaf istiqamətləri və tətbiq sahələri təhlil edilir. Fenomenoloji kinetika kimyəvi reaksiyaların sürətinin empirik və yarım-nəzəri üsullarla izahını verərək, reaksiyaların mexanizminin dərin elmi təhlilinə imkan yaradır. Müasir dövrdə hesablama kimyası, molekulyar modelləşdirmə və kvant kinetik yanaşmalar fenomenoloji kinetikanın inkişafına yeni impuls vermişdir. Məqalədə həm klassik, həm də müasir yanaşmalar müqayisəli şəkildə araşdırılmış, bu istiqamətin gələcək tədqiqat imkanları qiymətləndirilmişdir</p>
<p>Açar sözlər kimyəvi kinetika, fenomenoloji kinetika, reaksiya sürəti, aktivləşmə enerjisi, modelləşdirmə, kinetik tənliliklər</p>	<p>kinetika, reaksiya sürəti, aktivləşmə enerjisi, modelləşdirmə, kinetik tənliliklər</p>

Kimyəvi kinetika maddələrin çevrilmə proseslərinin zamanla necə baş verdiyini öyrənən elmin mühüm sahəsidir [1]. Bu elm sahəsi kimyəvi reaksiyaların mexanizmini, sürətini və onlara təsir edən amilləri araşdırır. Fenomenoloji kinetika isə bu ümumi istiqamətin empirik və yarım-nəzəri tərəfini təşkil edir; o, kimyəvi reaksiyaların sürət qanunlarının və kinetik sabitlərin təcrübi yolla müəyyən olunmasına əsaslanır [3].

Müasir kimya elminin inkişafı ilə əlaqədar olaraq fenomenoloji kinetika yalnız sadə reaksiyaları deyil, həm də çoxkomponentli, zəncirvari və katalitik reaksiyaları izah etmək üçün geniş imkanlar açır [5]. Fenomenoloji kinetikanın məqsədi kimyəvi reaksiyaların sürətini və mexanizmini riyazi və təcrübi şəkildə ifadə etməkdir [1]. Əsas anlayışlar - reaksiya sürəti, reaksiya tərtibi, sürət sabiti və aktivləşmə enerjisidir.

Reaksiya sürəti tənliyi ümumi şəkildə aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$v = k [A]^m [B]^n.$$

Burada k - sürət sabiti, $[A]$, $[B]$ - reagentlərin qatılığı, m və n isə reaksiya tərtibləridir. Arrhenius tənliyi ($k = z_0 e^{-E_a/RT}$) kimyəvi kinetikanın fenomenoloji əsasını təşkil edir [1,3]. Bu tənlilik temperaturun reaksiyanın sürətinə təsirini izah edir və aktivləşmə enerjisini təyin etməyə imkan yaradır [2].

Fenomenoloji kinetika sənaye kimyasında, katalitik sistemlərin optimallaşdırılmasında və ekokimyəvi proseslərin proqnozlaşdırılmasında geniş tətbiq tapır [4,5]. Məsələn, ammoniyakın sintezində, neftin krekinqi proseslərində və polimerləşmə reaksiyalarında fenomenoloji modellər istehsalın səmərəliliyini artırmaq üçün mühüm rol oynayır [2]. Həmçinin, biokimyəvi reaksiyalarda fermentativ sistemlərin kinetikasi fenomenoloji üsullarla öyrənilərək, Michaelis-Menten modeli kimi tanınmış tənliliklər əldə olunmuşdur [3].

Son onilliklərdə fenomenoloji kinetikanın inkişafına iki əsas istiqamət təsir göstərmişdir:

1. Hesablama kimyası və modelləşdirmə - molekulyar səviyyədə reaksiyaların dinamikasını kompüter simulyasiyaları ilə izləməyə imkan yaradır [2,5].
2. Qeyri-xətti kinetika və xaotik sistemlər - mürəkkəb reaksiya mexanizmlərinin öz-özünə təşkili və dinamik sabitlik məsələlərini izah edir [3].

Müasir tədqiqatlarda kinetik sabitlərin eksperimental təyini ilə yanaşı, kvant-kimyəvi üsullarla nəzəri hesablanması geniş yayılmışdır [1,2]. Bu, fenomenoloji kinetikanın yalnız empirik deyil, həm də fundamental əsaslara söykənən bir elm sahəsinə çevrilməsinə gətirib çıxarmışdır.

Fenomenoloji yanaşma sayəsində kimyəvi reaksiyaların idarə edilməsi və optimallaşdırılması mümkün olur [4]. Müxtəlif amillərin - təzyiq, temperatur, katalizator səthi və reagentin qatılığının - təsiri eksperimental modellərlə dəqiqliklə öyrənilə bilər [1,5].

Bu üsullar sənaye istehsalında enerjiyə qənaət, məhsuldarlığın artırılması və ekoloji təsirlərin azaldılması baxımından böyük əhəmiyyət daşıyır [3].

Fenomenoloji kinetikanın gələcək tədqiqat istiqamətləri aşağıdakı məsələlərə yönəlmişdir:

- Nanoölçülü sistemlərdə kinetik proseslərin modelləşdirilməsi [2];
- Süni intellekt və maşın öyrənməsi metodları ilə sürət sabitlərinin proqnozlaşdırılması [5];
- Biokimyəvi və farmasevtik reaksiyaların çoxparametrlilik kinetik təhlili [3].

Bu istiqamətlər fenomenoloji kinetikanın həm fundamental, həm də tətbiqi kimya sahəsində rolunu daha da gücləndirəcəkdir.

Hesablama kimyası, yəni **computational chemistry**, kimyəvi reaksiyaların molekulyar səviyyədə təhlilinə imkan verən sahədir. Bu yanaşma eksperimental üsullarla müəyyən etmək çətin olan sürətli və mürəkkəb prosesləri riyazi modellər və simulyasiyalar vasitəsilə öyrənməyə imkan verir. Fenomenoloji kinetikada hesablama kimyası bir neçə əsas istiqamətdə tətbiq olunur:

- **Molekulyar dinamika simulyasiyaları (MDS):** Bu metod reagentlərin, məhsulların və keçid vəziyyətlərinin atom və molekulyar səviyyədə hərəkətini izləməyə imkan verir. Simulyasiyalar sayəsində reaksiyaların mexanizmi, zəncirvari proseslərin sürətinə təsir edən amillər və enerji profilini dəqiqliklə öyrənmək mümkündür.
- **Kvant kimyəvi hesablama:** Kvant mexanikasına əsaslanan metodlar (məsələn, DFT - Density Functional Theory, ab initio üsulları) molekulların elektron strukturlarını təhlil edərək, aktivləşmə enerjisi, reaksiya potensial enerjisi səthlərini və keçid komplekslərinin xüsusiyyətlərini müəyyən edir. Bu, fenomenoloji kinetik modellərdə istifadə olunan sürət sabitlərinin daha dəqiq proqnozlaşdırılmasına şərait yaradır.
- **Kinetik modellərin proqnozlaşdırılması:** Hesablama kimyası ilə birləşdirilmiş simulyasiyalar mürəkkəb reaksiyaların dinamikasını öncədən proqnozlaşdırmağa imkan verir. Bu yanaşma eksperimental kinetik məlumatlarla müqayisədə daha sürətli nəticələr verir və yeni katalizatorlar, reagent qarışıqları və şəraitlər üçün optimallaşdırılmış modellər hazırlamağa kömək edir.
- **Mürəkkəb sistemlərin təhlili:** Nanoölçülü sistemlər, biokimyəvi fermentativ reaksiyalar və çoxkomponentli sənaye prosesləri üçün hesablama kimyası olmadan mexanizmləri anlamaq çətindir. Simulyasiyalar reaksiyaların molekulyar səviyyədə necə baş verdiyini göstərərək, fenomenoloji tənliklərin daha dəqiq və ümumiləşdirilmiş şəkildə qurulmasına imkan verir.

Hesablama kimyası və modelləşdirmə fenomenoloji kinetikanın müasir inkişafında əvəzsiz alət rolunu oynayır. O, yalnız təcrübə nəticələri dəstəkləmir, həm də reaksiyaların mexanizminin dərin izahını verir, yeni tədqiqat istiqamətlərini açır və kinetik modellərin proqnozlaşdırma dəqiqliyini artırır.

Qeyri-xətti kinetika və xaotik sistemlər kimyada və fizika sahəsində mürəkkəb reaksiya və prosesləri anlamağa kömək edir. Burada əsas məqam “qeyri-xəttilik” və “xaos” anlayışlarıdır.

1. Qeyri-xətti kinetika

- Klassik (xətti) kinetikada, reaksiya sürəti sadə xətti asılılıqlarla verilir: məsələn, bir reagentin qatılığı ilə düz mütənasibdir.
- Qeyri-xətti kinetikada isə reaksiya sürəti bir və ya bir neçə reaktantın qatılığının müxtəlif qüvvətləri və ya kombinasiyaları ilə bağlı olur. Nəticədə reaksiya nəticələri birbaşa xətti proqnozlaşdırıla bilmir. Kiçik dəyişikliklər böyük fərqlərə səbəb ola bilər.

2. Xaotik sistemlər

- Xaos buradakı “tam təsadüfi” mənasında deyil, müəyyən qaydalara əməl edən, amma uzunmüddətli davranışı öncədən çətin proqnozlaşdırılan sistemlər deməkdir. Məsələn, bəzi kimyəvi reaksiyalar öz-özünə davranış ritmini dəyişir, dövrü və ya çox kompleks nümunələr göstərir. Bu sistemlərdə kiçik başlanğıc fərqləri (məsələn, temperatur və ya qatılıq fərqləri) reaksiyanın gedişatında böyük dəyişikliklər yarada bilər.
- Öz-özünə təşkil: mürəkkəb reaksiyalar zamanla müəyyən müntəzəm strukturlar və nümunələr yarada bilər. Məsələn, Belousov-Zhabotinsky reaksiyasında (B-Z reaksiyası) rəng dəyişiklikləri müəyyən dövrlilik göstərir.
- Dinamik sabitlik: sistem daim dəyişir, amma müəyyən sabit nümunələr və ya balanslar saxlayır. Yəni, sistem tam xaos deyil, müəyyən tərtibatla hərəkət edir.

Qısa misal: B-Z reaksiyası: kimyəvi “oscillating reaction” (osillasiya edən reaksiya) kimi tanınır. Rəngi dəyişir, lakin bu dəyişikliklərin xüsusi qaydası və ritmi var. Burada həm qeyri-xətti kinetika, həm də xaos davranış görünür.

Kimyəvi kinetikanın fenomenoloji istiqaməti müasir elmin mühüm və dinamik inkişaf edən sahələrindən biridir [1]. O, reaksiyaların mexanizmlərini anlamağa, onların sürətini proqnozlaşdırmağa və praktiki tətbiqləri optimallaşdırmağa imkan verir [3]. Müasir hesablama metodları, riyazi modellər və eksperimental texnologiyalar fenomenoloji kinetikanın imkanlarını xeyli genişləndirmişdir [2,5].

Gələcək tədqiqatlar getdikcə aşağıdakı istiqamlərə yönələcək:

- Nanomiyasılı sistemlərin kinetik modelləşdirilməsi [2];
- Sürət sabitlərini proqnozlaşdırmaq üçün süni intellekt və maşın öyrənməsinin tətbiqi [5];
- Biokimyəvi və əczaçılıq proseslərində çoxdəyişkənli kinetik analiz [3].

Bu istiqamətlər empirik kimya ilə nəzəri molekulyar elm arasında körpü kimi fenomenoloji kinetikanın daha da güclənməsinə töhfə verəcəkdir.

Ədəbiyyat

- [1]. Laidler, K. J. Chemical Kinetics // Harper & Row, –New York, –1987.
- [2]. Atkins, P., Physical Chemistry / P. Atkins, J. de Paula –Oxford University Press, –2018.
- [3]. House, J. E. Principles of Chemical Kinetics // Academic Press, –2007.
- [4]. Espenson, J. H. Chemical Kinetics and Reaction Mechanisms // McGraw-Hill, –2002.
- [5]. Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyası. Kimyəvi proseslərin kinetikasi üzrə müasir tədqiqatlar, –Bakı, –2022.

Summary

The modern state of phenomenological kinetics of chemical kinetics

Cavadova S.N.

Keywords: chemical kinetics, phenomenological kinetics, reaction rate, activation energy, modeling, kinetic equations

This article analyzes the scientific foundations of phenomenological kinetics, one of the important areas of chemical kinetics, its modern development directions and application areas. Phenomenological kinetics provides an explanation of the rate of chemical reactions by empirical and semi-theoretical methods, allowing for a deep scientific analysis of the mechanism of reactions. In modern times, computational chemistry, molecular modeling and quantum kinetic approaches have given new impetus to the development of phenomenological kinetics. The article comparatively examines both classical and modern approaches, and evaluates the future research opportunities of this direction.

Резюме

**Современное состояние феноменологической кинетики химической кинетики
*Джавадова С.Н.***

Ключевые слова: *химическая кинетика, феноменологическая кинетика, скорость реакции, энергия активации, моделирование, кинетические уравнения.*

В данной статье анализируются научные основы феноменологической кинетики, одного из важных направлений химической кинетики, ее современные направления развития и области применения. Феноменологическая кинетика дает объяснение скорости химических реакций эмпирическими и полутеоретическими методами, что позволяет проводить глубокий научный анализ механизма реакций. В настоящее время вычислительная химия, молекулярное моделирование и квантово-кинетические подходы дали новый импульс развитию феноменологической кинетики. В статье проводится сравнительное исследование как классических, так и современных подходов, а также оцениваются будущие исследовательские возможности этого направления.

Obtaining active polysaccharides from basidiomycete fungal strains

Bunyatova Lala Novruz ^{ORCID 0000-0002-9140-745X}

Sumgayit State University, Sumgayit, Azerbaijan, ass. professor
matanat.musaeva@sdu.edu.az

ARTICLE INFO

Article history:
Received 01.12.2025
Received in revised form 03.02.2026
Accepted 26.02.2026

Keywords

bioactivity, cultivation, biomass,
fungal strains, polysaccharides

ABSTRACT

After extraction of polysaccharides from various strains of basidiomycetes grown in nature and on various nutrient media, the physico-chemical properties of the obtained samples were studied using several spectral methods. The purity of polysaccharide fractions was determined for the first time. It was found that the isolated polysaccharides are branched beta-glucan type polysaccharides with branching points.

Basidiomycetes can serve as sources of biologically active metabolites that are promising for use in biopharmaceuticals and biomedicine. Particular attention is paid to the development of methods for isolating biologically active substances from basidiomycetes, which are a promising object of research - determining the structure and bioactivity of the resulting bioactive compounds, as well as developing pharmaceuticals based on them that have immunomodulatory and antitumor properties [1,2]. In recent years, basidiomycetes have become the subject of in-depth research in terms of searching for new antitumor and various bioactive substances. Researchers have become increasingly interested in studying the cell wall composition of basidiomycetes. The polysaccharides they contain are among the most important components of organic compounds and are involved in many important biological processes. The polysaccharides contained in basidiomycetes accumulate in fruiting bodies and spores, and their concentration is particularly high in the mycelium [3]. These polysaccharides, as mentioned above, vary in their chemical structure, but all contain β -(1.3)-glucan groups in the main chain and β -(1.6)-glucan groups in the branched regions, which are responsible for biological activity. Chromatography-mass spectrometry is often used for the structural analysis of polysaccharides. The extracted polysaccharides are light brown powders, well soluble in water, forming an opaque solution at low concentrations and a viscous solution at high concentrations [4]. This method allows one to obtain information on the retention times of its components, their relative abundance in the mixture, and the mass spectra of each component in a single analysis. As natural raw materials for the extraction of water-soluble polysaccharides, selected basidiomycetes *Ganoderma lucidum*, collected from natural habitats in Republic of Azerbaijan, as well as those obtained by cultivation. Currently, scientific research is underway in Republic of Azerbaijan to identify natural sources rich in biologically active compounds, to isolate them, and to determine their structure and biological activity [5,6,7].

Methods

Cultivation process. From pure cultures of the fruiting bodies of this mushroom, a local strain, *Ganoderma lucidum*, was obtained for the first time using cultivation. To isolate water-soluble polysaccharides from the natural raw material, dried, crushed, and defatted tinder bodies were used, weighed, and extracted three times with hot water in a boiling water bath with a reflux condenser (Fig. 1 and 2). A water-soluble polysaccharide sample (100 mg) was dissolved in 5 ml of distilled water and loaded onto a column (14 × 3 cm). The polysaccharides were eluted sequentially

with a 0–1 M NaCl gradient solution at a flow rate of 60 ml/h. Fractions of 10 ml were collected. The polysaccharide yield from the column was monitored using the phenol-sulfuric acid method (Soy flour + glucose; Peptone + glucose; Yeast extract + sodium nitrate + glucose; Soy flour + vegetable oil; Peptone + vegetable oil; Yeast extract + sodium nitrate + vegetable oil). The fractions were pooled, concentrated, dialyzed, and lyophilized (Fig.4). A 5 mg sample of the polysaccharide was dissolved in 1.5 ml of dimethyl sulfoxide, 30–40 mg of finely ground sodium hydroxide was added, and then 0.5 ml of CH₃I was added with stirring. The reaction mixture was left for 1 hour, 5 ml of chloroform was added, and the mixture was washed several times with water. The chloroform solution was then evaporated, and the residue was hydrolyzed by heating with 1 ml of 2 M trifluoroacetic acid at 100°C for 8-9 hours. The acid was removed by evaporation with ethanol, and the resulting methylated monosaccharide derivatives were converted to polyol acetates and identified using a known method using chromatograph mass spectrometry. The cultivation process involved two stages: growing liquid seed material and accumulating the fungal biomass (Fig. 3).

Results. As a result of the study, branched polysaccharides were isolated from basidiomycete raw materials (locally grown and cultivated). The isolated fractions contain branched polysaccharides in the form of complexes with melanin.

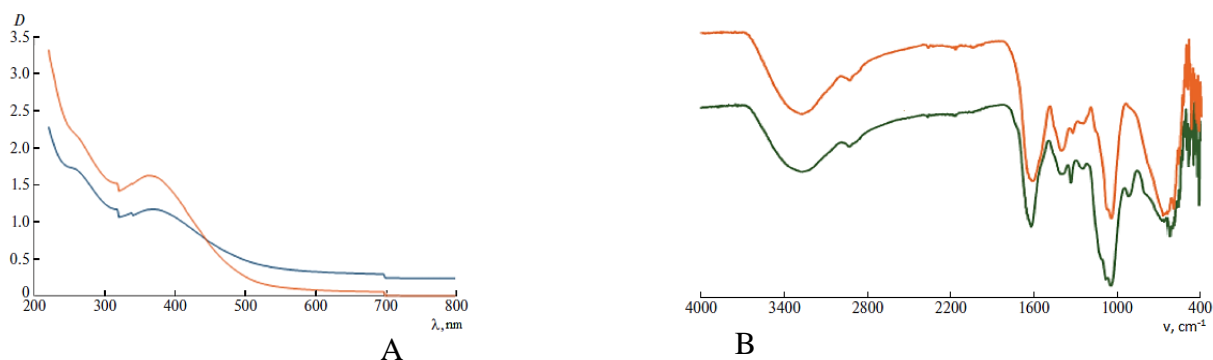
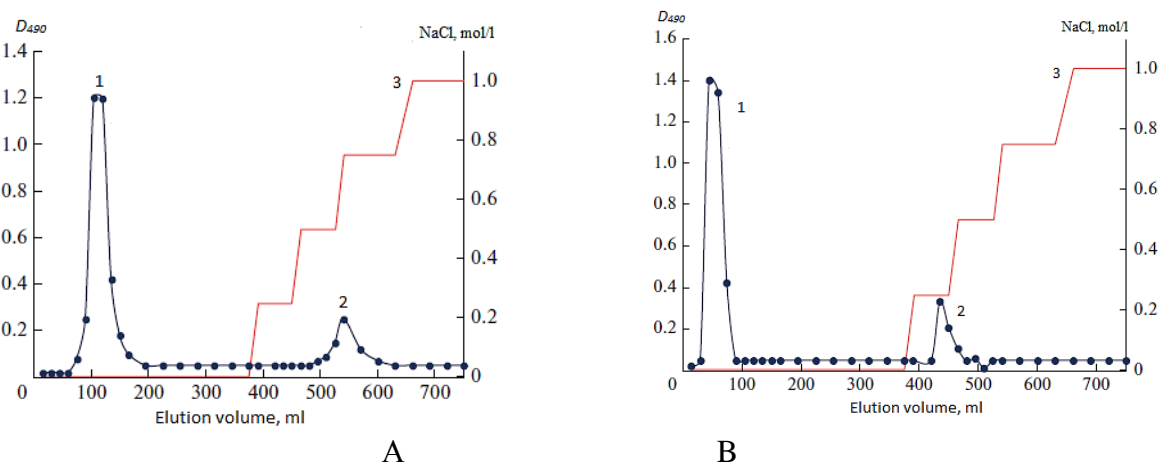


Figure 1. A - Spectrum of water-soluble polysaccharide fractions isolated from locally grown GW (red line) and cultivated GWL (blue line) basidiomycete raw materials; B - Infrared spectroscopy of isolated aqueous fractions of GW (orange line) and GWL (green line) polysaccharides



Note: 1 - neutral polysaccharides from locally grown basidiomycete raw materials; 2 – anionic polysaccharides; 3 - Eluent is a gradient solution of NaCl 0 - 1.0 mol/l, the elution rate is 1 ml/min.

Figure 2. A - Ion-exchange chromatogram of polysaccharides GW (1) and GW (2) in a DEAE-52 cellulose column; B - Ion exchange chromatogram of polysaccharides GWL (1), GWL (2) in a DEAE-50 cellulose column.

The degree of branching of β -D-glucans for locally growing basidiomycetes (GW) was proven to be 0.74, while for cultivated basidiomycetes (GWL) it was 0.38. Submerged cultivation allows for the production of biomass containing biologically active metabolites. This study demonstrated interferon-inducing activity of the total fraction of water-soluble polysaccharides, which is comparable to that of the positive control.

Table 1.

Amount and molecular weight of carbohydrates after fractionation

Basidiomycetes	Solvent	Polysaccharide	Amount of polysaccharide, %	Impurities, %
Locally growing	Water	GW-1	98.21	0.61
	0.1 M NaCl	GW-2	64.01	69.78
Cultured	Water	GWL-1	97.32	0.70
	0.1 M NaCl	GWL-2	77.54	66.50
Molecular weight parameters of polysaccharides				
Basidiomycetes	Fraction		$M \times 10^{-3}$	M_w/M_n
Locally growing	Water Fraction (GW)		12.2	1.5
	Neutral Polysaccharide (GW-1)		17.5	1.4
	Anionic Polysaccharide (GW-2)		10.4	1.4
Cultured	Water Fraction (GWL)		10.8	1.4
	Neutral Polysaccharide (GWL-1)		10.3	1.4
	Anionic Polysaccharide (GWL-2)		9.7	1.2

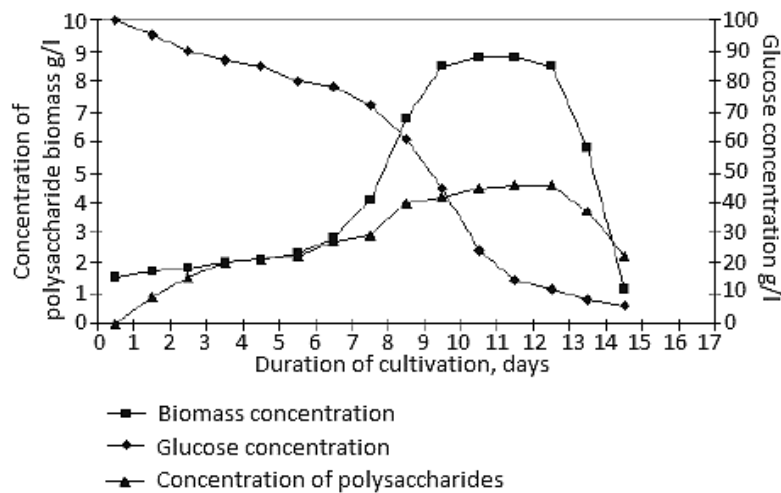
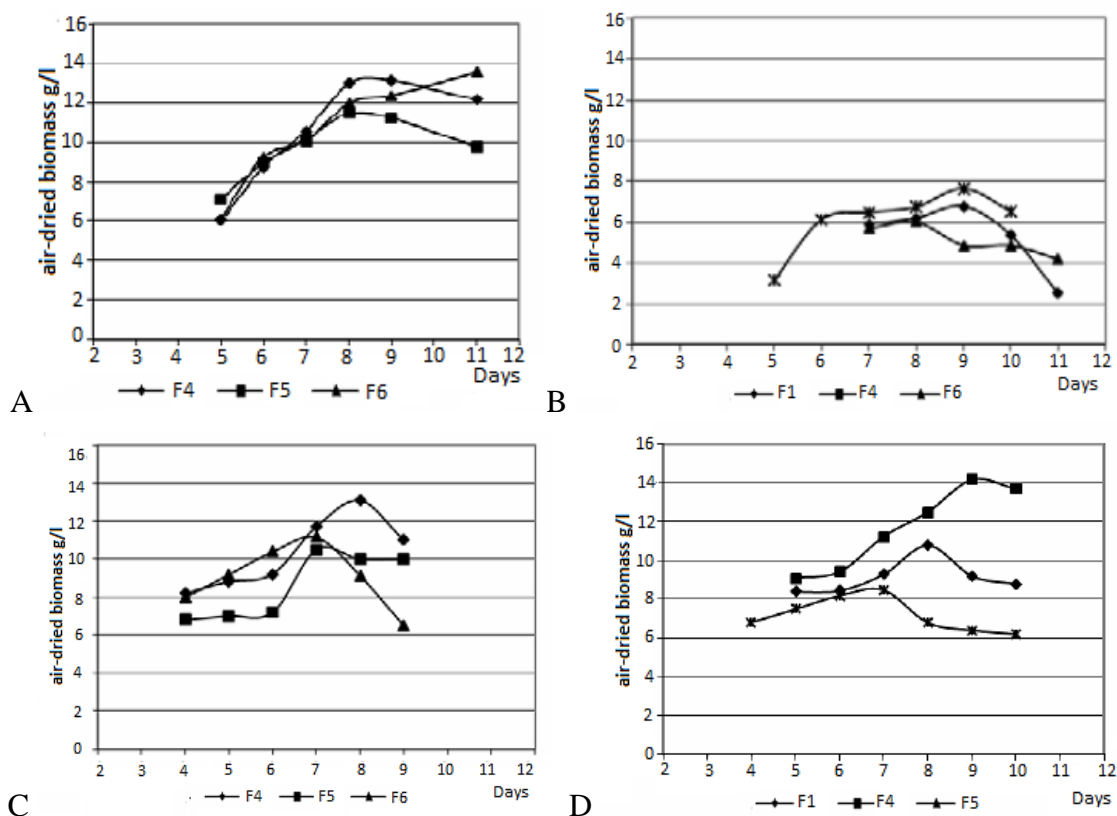


Figure 3. Dynamics of glucose consumption, accumulation of fungal biomass and polysaccharides (Cultivation in pure and together forms with each of the strains to be screened, in a liquid medium).

As a result of preliminary studies, three environments were selected for each strain that provided the highest yields of their biomass (Fig. 4). The process of submerged cultivation was studied on the media selected for each strain. The duration of experiments to study the dynamics of biomass accumulation of all strains did not exceed 12 days, regardless of whether the culture reached the last phase stage or not (Fig. 4 A-D).



Note: F1 - Soy flour + glucose; F2 - Peptone + glucose; F3 - Yeast extract + sodium nitrate + glucose; F4 - Soy flour + vegetable oil; F5 - Peptone + vegetable oil; F6 - Yeast extract + sodium nitrate + vegetable oil

Figure 4. Accumulation of biomass (Main results) of the studied fungal strains on selected media

References

- [1]. Hobbs, C. Medicinal mushrooms: an exploration of tradition, healing and cultures // Loveland: Interweave Press, Inc., –1995. –251 p.
- [2]. Bao, X.F., Phytochemistry / X.F.Bao, X.S.Wang, Q.Dong, [et al.] // –2002. vol. 59. –p 175.
- [3]. Li, Z., Liu, J., Zhao, Y. Journal of Biochemistry and Molecular Biology. 2005, vol. 38, no. 1, p 34.
- [4]. Gorin, P.A.J., Barreto-Berger, E. The Polysaccharides // Ed. by G.O. Aspinall. –New-York: Acad. Press, –1983. –p. 365.
- [5]. Bunyatova, L.N., Main eco-properties of hazelnut (*Corylus avellana* L.) on the Sheki-Zagatala economic region / L.N.Bunyatova, G.I.Mammadova, T.A.Hasanova [et al.] // International Journal of Advances in Applied Sciences (IJAAS). –2025, vol. 14, –no. 1, –p. 77-85.
- [6]. Bakhshaliyeva, K.F. A targeted fungal bioconversion strategy for renewable plant waste: solid-state fermentation with *Pleurotus ostreatus* (MBI-2022) and residual biomass valorization with *Trichoderma* spp. International / K.F.Bakhshaliyeva, S.A.Jafarzadeh, V.V.Musayeva, [et al.] // Journal of Agriculture and Biosciences. –2025. vol. 15, –no. 3, –p. 112-118/
- [7]. Miles, Ph.G., Chang, S.T. Mushroom biology. Concise basics and current developments // World Scientific, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong, –1997. –194 p.

Xülasə

Basidiomiset göbələyinin şammlarından fəal polisaxaridlərin alınması

Bunyatova L.N.

Açar sözlər: *bioaktivlik, əkilmə, biokütlə, göbələk şammları, polisaxaridlər*

Təbii halda və müxtəlif qidalı mühitlərdə yetişdirilən basidili göbələklərin müxtəlif şammlarından polisaxaridlərin alınmasından sonra, əldə edilən nümunələrin fiziki-kimyəvi xüsusiyyətləri bir neçə spektral metodlardan istifadə etməklə öyrənilmişdir. İlk dəfə olaraq, polisaxarid fraksiyalarının saflığı müəyyən edilmişdir. İzolyasiya edilmiş polisaxaridlər şaxələnmə nöqtələrinə malik şaxələnməmiş β -qlükan tipli polisaxaridlər olduğu müəyyənləşdirilmişdir.

Резюме

Получение активных полисахаридов из штаммов базидиомицетных гриба

Буньятова Л.Н.

Ключевые слова: *биоактивность, культивирование, биомасса, штаммы грибов, полисахариды*

После экстракции полисахаридов из различных штаммов базидиомицетов, выращенных в природе и на различных питательных средах, физико-химические свойства полученных образцов были изучены с использованием нескольких спектральных методов. Впервые была определена чистота полисахаридных фракций. Было установлено, что выделенные полисахариды представляют собой разветвленные полисахариды β -глюканового типа с точками разветвления.

Development of a model to study *Adamts3* gene in myogenic cells

Gasimova Gulchin Elchin

Sumgayit State University, Sumgayit, Azerbaijan, teacher

gulchin.gasimova@sdu.edu.az

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Article history: Received 14.11.2025 Received in revised form 28.01.2026 Accepted 16.02.2026</p>	<p><i>The research involved culturing C2C12 cells and transfecting them with a pX459 plasmid containing double-guide RNA (dgRNA), Cas9 protein, and a puromycin resistance gene (puroR) by using JetOPTIMUS transfection reagent. Post-transfection, cells were treated with puromycin, an antibiotic that inhibits protein synthesis, allowing only cells with the integrated resistance gene to survive. Following puromycin selection, cells with successful modifications were clonally expanded and genotyped, revealing a transfection efficiency of 12.2%, with 77% of expanded clones showing wild-type genotypes. These findings suggest the need to refine the gene-editing strategy, potentially by using single-guide RNAs (sgRNAs) and optimizing transfection conditions. Although the targeted exon 2 deletion was not achieved, this model provides insights into gene-editing approaches and the involvement of Adamts3 in myogenesis.</i></p>
<p>Keywords CRISPR/Cas9, Adamts3, Myogenesis, Puromycin selection, Double-guide RNA (dgRNA), NHEJ DNA repair</p>	

Introduction

Skeletal muscle tissue is important for vital functions such as locomotion and respiration. Furthermore, it helps maintain glucose homeostasis and thermoregulation, stores amino acids during critical illnesses, and protects bones and internal organs. Loss of muscle mass due to aging or disease can impair these functions, leading to frailty, increased risk of falls and fractures, and loss of independence [1]. There are significant individual differences in muscle mass even before aging begins to reduce it. Studies indicate that 30–60% of these differences are due to genetic variability [5]. Reverse genetics studies have revealed several essential genes involved in myogenesis and growth [9]. Nevertheless, it is uncertain whether natural variants in these genes demonstrate differences in muscle mass and function. Recent genome-wide association studies (GWAS) reveal that the majority of critical genes regulating myogenesis and muscle growth lie beyond the approximately 180 genomic areas linked to muscle mass in humans [6].

This project focuses on the *Adamts3* gene because of its undiscovered significance in muscle tissue, particularly in myogenic cells. *Adamts3* belongs to the ADAMTS family (A Disintegrin and Metalloproteinase with Thrombospondin Motifs), which is involved in remodeling the extracellular matrix (ECM), a process vital for muscle development and repair.

Moreover, recent *in silico* studies have demonstrated the significance of particular single nucleotide polymorphisms (SNPs) in the *Adamts3* [10]. Cells have the ability to proliferate, grow, and differentiate into contractile myotubes [4]. This study utilizes CRISPR/Cas9 technology in C2C12 cells to develop a reliable model to elucidate the functions of *Adamts3* in muscle development and pathology [7]. However, this repair mechanism is error-prone and can lead to deletions and functional disruptions in the *Adamts3* gene [8].

Materials and methods

To investigate the role of the *Adams3* gene in myogenic lineage, exon 2 was specifically targeted for excision in C2C12 cells. Subsequent to this targeted modification, clones of C2C12 cells were developed and genotyped to test the accuracy of the genetic modification.

Cell culture. C2C12 cells were cultured in Dulbecco's modified Eagle's medium (DMEM; Sigma) supplemented with 10% fetal calf serum (FCS, Gibco™) and 2% glutamine (Gibco™). They were maintained at 37°C and 5% CO₂ in a humidified incubator and passaged regularly when they had 50-70% confluence [4].

Transfection. Cell transfection enables the introduction of genetic materials within the pX459 plasmid (see figure 1) into low-passage C2C12 cells by using JetOPTIMUS® (Polyplus-transfection® SA, New York, NY) transfection reagent [8]. The dgRNA consists of a CRISPR RNA (crRNA) and a trans-activating CRISPR RNA (tracrRNA), which together form a complex that guides the Cas9 protein to the specific genomic target site, facilitating precise DNA cleavage [12]. JetOptimus® was chosen over other transfection reagents due to its distinct formulation that enhances the delivery of the CRISPR/Cas9 plasmid into mammalian cells, including the notoriously difficult-to-transfect myoblast cells such as C2C12. The formulation of JetOptimus® is specifically designed to protect the DNA during the process, enhance cellular uptake, and minimize cytotoxicity [4].

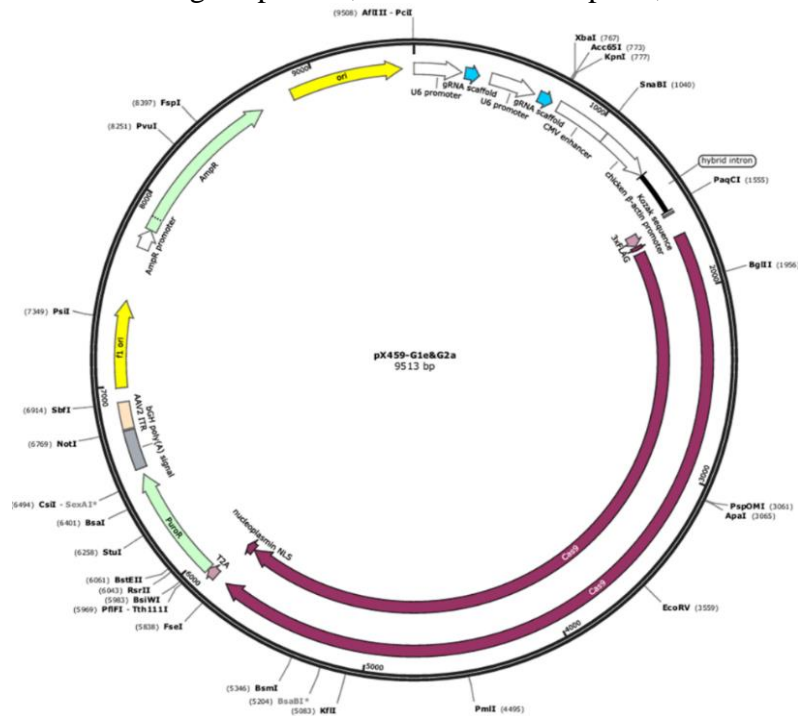


Figure 1. Plasmid map of X459-G1e&G2a (9513 bp)

The pX459-G1e&G2a plasmid was engineered by Ms. Sonja Rauber. It is a 9513-base pair circular DNA construct designed for precise gene editing applications. This plasmid includes several essential components: dgRNA, Cas9 protein, and puroR.

The transfection procedure was done for 2 days following a modified protocol described by Taye and colleagues [11]. On the first day, a cell suspension of 48,000 C2C12 cells in 1 mL of growth medium (GM) was prepared, with 500 µL of the suspension added to two wells of a 24-well plate (density of 12.5k cells/cm²). One well was labeled as transfected and the other as a control, and both were incubated overnight. The following day, both of the wells were replaced with Growth Medium. The transfection reagent was brought to room temperature and briefly vortexed. A 1:1.5 dilution of 0.5 µg plasmid DNA in 50 µL of JetOPTIMUS buffer was prepared, vortexed for 1 second, and briefly spun down. After a 4-hour incubation, the medium was replaced with fresh

growth medium. Transfected myoblasts were cultured for 24 hours to allow for the expression of the transfected plasmid DNA [4].

Puromycin Selection. In this step, the medium in which the cells were growing was replaced with a fresh GM. The cells were then exposed to the antibiotic at a concentration of 5 µg/mL for 5 days according to the protocol described by Taye and colleagues [11].

Clonal Expansion. Following puromycin selection, the surviving cells were expanded for a week and subjected to clonal selection in accordance with the protocol described by Bauer and colleagues [2]. Initially, the transfected well was refreshed with new GM while the control well was discarded as all of them died. During the following 2-3 weeks, well-plates were screened with an inverted microscope, and 57 wells contained colonies of single-cell origin.

Genotyping. The final step in the process was genotyping the expanded clones to confirm the deletion. First of all, GM was removed and the cells were washed with PBS, trypsinized, and 20% of the cells were seeded in a 24-well plate for further culture, while the remaining 80% were transferred to an Eppendorf tube and genotyped.

PCR amplification of the CRISPR targeted region. Using the NCBI Primer-BLAST tool (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast/>), a pair of primers was designed to amplify a region spanning the gene deletion site [3]. Sequences of primers used are presented in Table 1 and target region for *Adamts3* gene is shown in Fig 2.

Table 1.

Sequence of primer (with amplicon size) used to amplify CRISPR target region of Adamts3 gene.

Gene Targeted	Direction and Name	Primer Sequences (5' to 3')	Amplicon size
Adamts3	Forward (A3-F2)	CCAAAGAGGCCATTGAGGGT	555 bp
	Reverse (A3-R2)	CAGCTTGCACCCAGTCAGTA	

Guide1 GAGCCTTCTAGGAACAACCG
 Guide2 GATAAGAGTGACATTTGAGA (note: complementary strand)

ggcatttctctagttgattcttaggattcaggccacttctcacctggtgaaatgtagactac
 gccccagcccccccccttctctgattcgtgacttagtattggagttttccaaagag
 gccattgagggtcactatcttactctcttcacagatactaaaattaaagctggccaacagt
 ccctctctcacatagtcataagaattggctcatgttctctgtcacaagagccttctaggaaca
 ccgggggtcaggcttcaggcagcaattccagctctctgggtctcctgattagccagtccccc
 aaagcactgatggtagaaataaccaagcagcgagataagatgaaaccagtaaccgtttctt
 ttcttctgctccccaccctcctttccagGCTGGTACTGACGAAATGGTGCAAATAGgtaagc
 ctcttctcaaatgtcactcttatctagctgtgagctgagaacaaagttaaggccaagcaa
 aagaactgtttctgaaagtcttctaatgagtggttaaaataatggatagcttggaaatcatt
 tctactcttctgctttccgtgggtgggtcgatgttctctcgggctaagttatagtgcatca
 atagccttccacttctggagcatcaatttatTactgactgggtgcaagctgctgctatgcc
 tgggagagttacagtgggtcggaacaccagagatgtataaagtttagaccctcaacttgtgt
 aacataaggagaacaaatcttagttataactgaagacggtgtcaggatgctaggataaagg
 gaaaagatgaagagaaaattc

Figure 2. Sequence of *Adamts3* gene derived from the muscle of mouse. The PCR amplified region encompassing the CRISPR target in exon 2 is indicated in red, guide RNA sequences are highlighted in green and the positions of the primer (F2 and R2) used for PCR amplification are shown in pink (see amplicon sizes in Table 1).

Image Analysis. The acquired images of transfected and puromycin-selected cells were analyzed using ImageJ software. These measurements were used to set the scales to 200 µm and 400 µm correspondingly. Next, a square with dimensions 500 µm by 500 µm was drawn in the center of the image using the rectangle tool. The images were analyzed to determine the number of cells per 250,000 µm².

Results

To establish an effective CRISPR/Cas9 system, the pX459 plasmid containing a dgRNA, a Cas9 nuclease expression cassette, and a puromycin N-acetyltransferase was introduced for the selection of transfected cells (Figure 3).

Transfection and puromycin selection results: Initially, low-passage C2C12 cells were transfected, with one well serving as the control. As a result, 82 transfected and 21 control cells were counted (Figure 3A). Furthermore, selection of puromycin-resistant C2C12 cells was achieved within 9 days post-transfection due to the efficient elimination of non-resistant cells (Figure 3B). Typically, more than 80% of the cells detached from the cell culture dish and were eliminated during regular maintenance. The transfection efficiency is 12.2%, as indicated by the survival of 10 out of 82 cells after puromycin selection (Figure 3C).

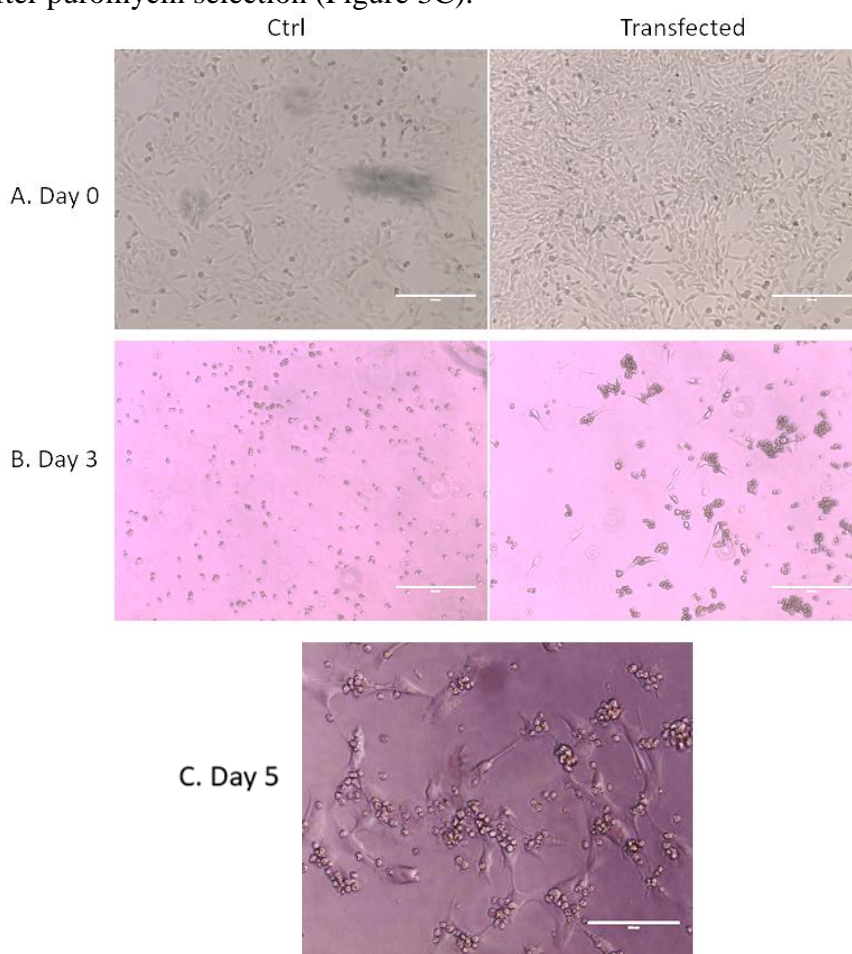


Figure 3. The efficiency of transfection and subsequent puromycin selection in C2C12 cells.

(A) The panels demonstrate images of control and transfected cells cultured in complete DMEM immediately after transfection, with pX459 plasmid showing similar cell density. Scale bars = 400 μm .

(B) The panels demonstrate the effect of puromycin selection by day 3, showing that only transfected cells with the puromycin resistance gene survive, while control cells have died. Scale bars = 400 μm .

(C) The panel demonstrates the continued viability of transfected cells by day 5, indicating the successful selection and transfection. Scale bars = 200 μm .

Clonal selection and genotyping results: Surviving cells were expanded as a total of 600 C2C12 cells were seeded throughout nine 96-well culture plates. The growth of the cells was

monitored over a period of 2-3 weeks. Out of all the colonies observed during this time, a total of 57 colonies were chosen. It accounts for 9.5% of the seeded cells. Moreover, out of these 57 colonies, the majority (96.5%) were made up of single cells, while a small portion (0.8%) comprised of two colonies (see Figure 4).

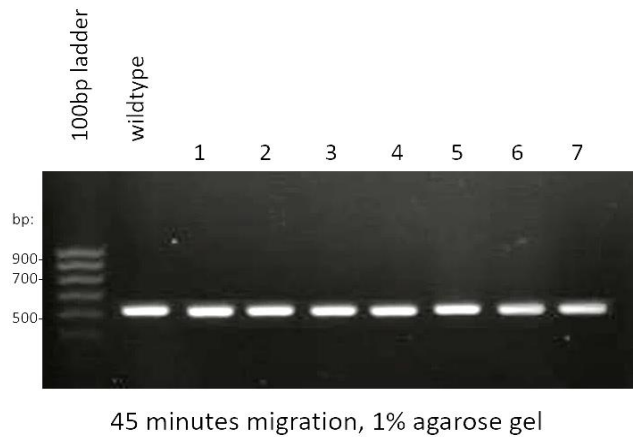


Figure 4. Screening of C2C12 clones generated from CRISPR-Cas9 plasmid pX459 to detect potential deletion of exon 2. The CRISPR-targeted locus was PCR amplified from genomic DNA using 555 bp amplicon size, and PCR products were size-separated by electrophoresis on a 1% agarose gel for 45 minutes.

Discussion

The study aimed to develop a model to study the role of *Adamts3* in myogenic tissue development and growth by generating C2C12 cell clones with a targeted deletion of exon 2 using CRISPR/Cas9 technology. The outcomes of transfection, puromycin selection, clonal expansion, and genotyping indicated that all of these clones ended up with wild-type genotypes, suggesting potential directions for further research.

These findings suggest that utilizing sgRNAs instead of dgRNAs may provide effective consequences in this research. This approach ensures that both guides are capable of inducing DSBs independently, increasing the likelihood of successful exon excision when used together, as the research performed by Ran et al. (2013) demonstrated that this approach is highly effective in guiding Cas9 to specific genomic loci [8].

Moreover, optimizing the transfection conditions may lead to achieving maximal efficiency without inducing cytotoxicity. Studies by Cocchiari et al. (2014) have demonstrated that optimizing these parameters is essential for achieving high transfection efficiency while minimizing cell death. Reagents can be designed specifically for C2C12 cells with the higher concentration of reagents, considering the toxicity effect and increasing efficiency. Viafect™ and Fugene® HD reagents show higher efficiency when reducing cell confluency, while higher cell density was required to limit cytotoxicity conferred by Avalanche® [4].

To conclude, this research model suggests potential outcomes for investigating muscle differentiation and growth, whereas the role of *the Adamts3* gene in C2C12 cells still needs further study. By considering the use of sgRNAs, optimization of transfection conditions, and contextualizing these findings within the broader field of myogenic research, this model demonstrates a comprehensive approach for identifying the role of this gene in muscle development and growth.

References

- [1]. Alfonso J. Cruz-Jentoft, Jean Pierre Baeyens, Jürgen M. Bauer, Yves Boirie, Tommy Cederholm, Francesco Landi, Finbarr C. Martin, Jean-Pierre Michel, Yves Rolland, Stéphane M. Schneider, Eva Topinková, Maurits Vandewoude, Mauro Zamboni, Sarcopenia: European

- consensus on definition and diagnosis: Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People, Age and Ageing, Volume 39, Issue 4, July 2010, Pages 412–423, <https://doi.org/10.1093/ageing/afq034>
- [2]. Bauer, D. E. Generation of genomic deletions in mammalian cell lines via CRISPR/Cas9. / D. E. Bauer, M.C. Canver, S.H. Orkin // Journal of visualized experiments: JoVE 472 (95): 2015, – p.52118. <http://dx.doi.org/10.3791/52118>
- [3]. Bhattacharya, D. A simple genotyping method to detect small CRISPR-Cas9 induced indels by agarose gel electrophoresis / D. Bhattacharya, E.G. Van Meir // Sci Rep 9, –2019, –p.4437. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39950-4>
- [4]. Cocchiariro, I. Back to basics: Optimization of DNA and RNA transfer in muscle cells using recent transfection reagents / I. Cocchiariro, P. Castets, M. Cornut, [et al.] // Gene Therapy, – 2022. 20(3), –p.123-135. <https://doi.org/10.1016/j.yexcr.2022.113392>
- [5]. Hernandez Cordero, A.I. Genome-wide Associations Reveal Human-Mouse Genetic Convergence and 531 Modifiers of Myogenesis, CPNE1 and STC2 / A.I. Hernandez Cordero, N.M. Gonzales, C.C. Parker [et al.] // American Journal of Human Genetics. –2019. 532 105: – p.1222-1236. <https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2019.10.014>
- [6]. Lekkos, K. Validation of positional candidates *Rps6ka6* and *Pou3f4* for a locus associated with skeletal muscle mass variability / K. Lekkos, A.A. Bhuiyan, A.M.K. Albloshi, [et al.] // *G3 Genes/Genomes/Genetics*, Volume 14, Issue 5, May 2024, jkae046, <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkae046>
- [7]. Niccheri, F. An efficient method to enrich for knock-out and knock-in cellular clones using the CRISPR/Cas 9 system / F. Niccheri, R. Pecori, S.G. Conticello // Cell. Mol. Life Sci. –2017, 74, –p.3413–3423. <https://doi.org/10.1007/s00018-017-2524-y>
- [8]. Ran, F., Hsu, P., Wright, J. *et al.* Genome engineering using the CRISPR-Cas9 system / F. Ran, P. Hsu, J. Wright, [et al.] // Nat Protoc 8, –2013, –p.2281–2308. <https://doi.org/10.1038/nprot.2013.143>
- [9]. Rudnicki, M.A. Inactivation of MyoD in mice 581 leads to up-regulation of the myogenic HLH gene Myf-5 and results in apparently normal 582 muscle development / M.A. Rudnicki, T. Braun, S. Hinuma, [et al.] // Cell 71: –1992, –p.383-390. [https://doi.org/10.1016/0092-8674\(92\)90508-A](https://doi.org/10.1016/0092-8674(92)90508-A)
- [10]. Shinwari, K. In-silico assessment of high-risk non-synonymous SNPs in ADAMTS3 gene associated with Hennekam syndrome and their impact on protein stability and function / K. Shinwari, Y. Wu, H.M. Rehman, [et al.] // BMC bioinformatics, 24(1), –2023. –p.251. <https://doi.org/10.1186/s12859-023-05361-6>
- [11]. Taye, N. Stable knockdown of genes encoding extracellular matrix proteins in the C2C12 myoblast cell line using small-hairpin (sh)RNA / N. Taye, S. Stanley, D. Hubmacher, // Gene Therapy, 25(4), –2022. –p.456-467. <https://doi.org/10.3791%2F60824>
- [12]. Zhang, H. A novel sgRNA selection system for CRISPR-Cas9 in mammalian cells / H. Zhang, X. Zhang, C. Fan, [et al.] // Nature Biotechnology, 40(2), –2022. –p.123-135. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bbrc.2016.02.041>

Xülasə

Miogen hüceyrələrdə *Adamts3* geninin tədqiqi üçün modelin tətbiqi Qasimova G.E.

Açar sözlər: CRISPR/Cas9, *Adamts3*, Miyogenez, Puromisin seleksiyası, İki-bələdçi RNT (dgRNA), NHEJ DNT bərpası

Bu tədqiqatın məqsədi *Adamts3* geninin funksional rolunu müəyyənləşdirmək üçün Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats-associated protein 9 nuclease (CRISPR/Cas9) texnologiyasından istifadə etməklə genin 2-ci ekzonunu hədəfləyən (*Adamts3*-ΔE2) modelin yaradılması olmuşdur. Bu yanaşma, genin funksional aktivliyini dayandırmaq məqsədilə mutasiyaların induksiya edilməsinə əsaslanmışdır.

Tədqiqat çərçivəsində C2C12 hüceyrə xətti kultivasiya edilmiş və pX459 plazmidi vasitəsilə transfeksiya olunmuşdur. Sözügedən plazmid iki-bələdçi RNT (dgRNA), Cas9 proteini və puromisinə davamlılıq geni (puroR) daşımışdır. Həmçinin plazmid JetOPTIMUS transfeksiya reagentindən istifadə olunaraq hüceyrələrə daxil edilmişdir. Transfeksiyadan sonra hüceyrələr puromisin antibiotiki ilə seleksiya olunmuşdur. Puromisin zülal sintezini blokladığından yalnız davamlılıq genini daşıyan hüceyrələr sağ qala bilmişdir. Puromisin seleksiyasından sonra uğurla modifikasiya olunmuş hüceyrələr klonlaşdırılaraq çoxaldılmış və genotipləndirilmişdir. Nəticələrə əsasən, transfeksiya effektivliyi 12,2% olmuş, klonlaşdırılmış hüceyrələrin isə 77%-nin dəyişməmiş (wild-type) genotipə malik olduğu müəyyən edilmişdir. Əldə edilmiş nəticələr gen-redaktə strategiyasının təkmilləşdirilməsinin zəruriliyini təsdiqləyir — xüsusilə tək-bələdçi RNT (sgRNA) tətbiqinin və transfeksiya prosesinin optimallaşdırılmasının vacibliyini vurğulayır.

Резюме

Разработка модели для изучения гена *Adamts3* в миогенных клетках

Гасимова Г.Э.

Ключевые слова: *CRISPR/Cas9, Adamts3, миогенез, отбор пурамицином, двойная направляющая РНК (dgRNA), репарация ДНК по механизму NHEJ.*

В исследовании осуществлялось культивирование клеток C2C12 и их трансфекция плазмидой pX459, содержащей двойную направляющую РНК (dgRNA), белок Cas9 и ген устойчивости к пурамицину (puroR), с использованием трансфекционного реагента JetOPTIMUS.

После трансфекции клетки обрабатывали пурамицином — антибиотиком, который ингибирует синтез белка, что позволяло выжить только клеткам с интегрированным геном устойчивости. После отбора пурамицином клетки с успешными модификациями подвергались клональному расширению и генотипированию, что показало эффективность трансфекции 12,2%, причём 77% расширенных клонов имели генотип дикого типа. Эти данные указывают на необходимость уточнения стратегии редактирования генов, возможно, с использованием однонаправляющих РНК (sgRNA) и оптимизацией условий трансфекции. Несмотря на то что удаление целевого экзона 2 не было достигнуто, эта модель предоставляет представление о подходах к редактированию генов и роли *Adamts3* в миогенезе.

Viləşçay hövzəsi yamaclarının dərininə parçalanmasının morfometrik tədqiqiAlməmmədli Məsud Gülah oğlu **ORCID** 0000-0002-3105-9297*Sumqayıt Dövlət Universiteti, Sumqayıt, Azərbaycan, c.f.d, baş müəllim*
masud.almammadli@sdu.edu.az**MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT****XÜLASƏ****Məqalənin tarixçəsi**

Daxilolma tarixi: 23.09.2025

Düzəliş tarixi: 16.01.2026

Qəbul olunma tarixi: 06.02.2026

Açar sözlər

morfometrik təhlil, yamac parçalanması, Viləşçay hövzəsi, GIS-tehnologiyaları, geomorphologiya, hövzə yanaşması, geoxətlər

Bu tədqiqat, Azərbaycanın cənub-şərqində yerləşən Vilyaşçay çayı hövzəsində yamacların parçalanma dərinliyinin morfometrik təhlilini təqdim edir. Tədqiqatda relyefin parçalanma dərəcəsinin öyrənilməsində dəqiqliyi artırmaq məqsədilə GIS texnologiyalarından və hövzə yanaşmasından istifadə olunmuşdur. Rəqəmsal relyef modellərinin (DEM) və Sentinel-2 peyk məlumatlarının inteqrasiyası yamacların identifikasiyası və risk qiymətləndirilməsinin dəqiqliyini artırmış, tektonik və eroziya təsirlərini ön plana çıxarmışdır. Böyük Qafqaz və Əlborz dağları ilə aparılan müqayisəli təhlil Vilyaşçay hövzəsinin özünəməxsus geomorfoloji xüsusiyyətlərini ortaya qoymuşdur. Əldə olunan nəticələr relyefin formalaşması, tektonik proseslər və landşaftın təkamülünü anlamağa töhfə verir və torpaqdan istifadənin planlaşdırılması, eroziyanın qarşısının alınması və dayanıqlı turizm inkişafı üçün praktik əhəmiyyət daşıyır. Hövzə əsaslı GIS yanaşması ənənəvi tor əsaslı metodlardan üstün olmaqla, global miqyasda geomorfoloji tədqiqatlar üçün miqyaslanma bilən bir çərçivə təqdim edir

Giriş

Viləşçay hövzəsi, Azərbaycanın cənub-şərqində, Talış dağ sistemində yerləşən, relyefin güclü parçalanması, aktiv tektonika və müxtəlif litologiya ilə xarakterizə olunan geoloji cəhətdən dinamik bir bölgədir. Yamacların dərininə parçalanmasının morfometrik təhlili landşaftın inkişafını, geomorphological prosesləri və uçqun, sel və daşqın kimi geoxətlərə həssaslığı anlamaq üçün mühüm alətdir. Ənənəvi sətər əsaslı morfometrik metodlar təsadüfi hündürlük seçimi səbəbindən qeyri-dəqiq nəticələr verir [7]. Bunun əksinə, hidroloji və topoqrafik sərhədləri nəzərə alan hövzə əsaslı yanaşma relyef təhlili üçün daha dəqiq çərçivə təklif edir [6, s.76-80; 10].

Tədqiqat ərazisi, Elburs-Talış dağlıq silsiləsinin bir hissəsi olaraq, Xəzər dənizinə yaxınlığı səbəbindən tektonik-geomorfoloji qarşılıqlı təsirləri öyrənmək üçün əsas bölgədir. Talış dağlarında əvvəlki geomorfoloji tədqiqatlar aparılmış olsa da [3; 4], müasir GIS və uzaqdan zondlama texnologiyalarından istifadə edən kompleks morfometrik təhlillər məhduddur. Bu tədqiqat bu boşluğu doldurmaq üçün yüksək dəqiqlikli topoqrafik xəritələr və Sentinel-2 təsvirlərindən istifadə edərək yamacların dərininə parçalanma dərəcələrini kəmiyyətləşdirir, onların məkan paylanmasını qiymətləndirir və torpaq istifadəsinin planlaşdırılması ilə geoxətlər azaltma tədbirləri üçün təkliflər verir.

Tədqiqatın məqsədləri:

1. Viləşçay hövzəsində yamacları dərininə parçalanma dərəcələrinə görə ayırmaq və təsnif etmək;
2. tektonik, litoloji və eroziya proseslərinin qarşılıqlı təsirini təhlil etmək; (3) davamlı torpaq idarəetməsi və turizm inkişafı üçün praktik tövsiyələr təqdim etməkdir.

Materiallar və metodlar

Viləşçay hövzəsi, Azərbaycanın cənub-şərqində, 781,69 km² sahəni əhatə edir və dəniz səviyyəsindən Kömürküy dağında 2493 m-ə qədər müxtəlif topoqrafiyaya malikdir. Hövzənin orta

və aşağı axınları rütubətli subtropik zonada yerləşir, Viləşçay çayı Xəzər dənizinə tökülür. Müxtəlif çökmə və vulkanik süxurlardan ibarət mürəkkəb geologiyası və aktiv tektonik qırılmalar relyefin güclü parçalanmasına səbəb olur [5].

Azərbaycan Dövlət Kartografiya Agentliyindən əldə edilmiş 1:10,000 miqyaslı yüksək dəqiqlikli topoqrafik xəritələrdən istifadə edərək 464 elementar yamac ayrılmışdır. Dərininə parçalanma dərəcəsi (ΔH) aşağıdakı formula ilə hesablanmışdır:

$$\Delta H = H_{max} - H_{min}$$

burada ΔH – dərininə parçalanma dərəcəsi, H_{max} – yamacın maksimum hündürlüyü, H_{min} – yamacın minimum hündürlüyüdür. Topoqrafik xəritələrdən 10 m qətnaməli rəqəmsal relyef modeli (DEM) yaradılmış, yamac sərhədlərinin dəqiqliyini artırmaq üçün 2024-cü ildə əldə edilmiş Sentinel-2 peyk təsvirləri (10 m xəta) inteqrasiya edilmişdir. Hövzə əsaslı yanaşmaya uyğun olaraq yamacların ayrılması üçün suayrıcı təhlili alətləri tətbiq edilmişdir. Dərininə parçalanma dərəcələri yeddi intervalda təsnif edilmişdir: 0–200 m, 200–400 m, 400–600 m, 600–800 m, 800–1000 m, 1000–1200 m və >1200 m.

Məkan təhlilləri ArcGIS 10.2.1-də Spatial Analyst və 3D Analyst alətləri ilə aparılmış, sahə ölçüləri, statistik modelləşdirmə və xəritə tərtibi həyata keçirilmişdir. Parçalanma kateqoriyaları üzrə məkan dəyişkənliyini qiymətləndirmək üçün ANOVA testi tətbiq edilmişdir. Azərbaycan Geoloji Xidmətindən əldə edilmiş litoloji və seysmik məlumatlarla inteqrasiya edilərək geoxətər həssaslıq indeksi hazırlanmışdır. DEM-in dəqiqliyini təmin etmək üçün 10 sahədə yerində yoxlama aparılmış, səhv faizi 5%-dən aşağı olmuşdur. Nəticələr tematik xəritələr (Şəkil 1 və 2), statistik diaqramlar və cədvəllərdə (Cədvəl 1 və 2) ümumiləşdirilmişdir.

Tədqiqatın müzakirəsi

Morfometrik təhlil Viləşçay hövzəsində orta dərəcədə parçalanmış yamacların (400–800 m) dominant olduğunu göstərir, bu yamaclar 461,92 km² (59,09%) sahəni və 270 yamac (58,19%) təşkil edir. Əsasən orta və yüksək dağlıq zonlarda yerləşən bu yamaclar aktiv eroziya və denudasiya prosesləri ilə formalaşır, dağ-piyada turizmi üçün uyğundur, lakin eroziyaya nəzarət üçün investisiyalar tələb edir. Zəif parçalanmış yamaclar (0–400 m) 189,10 km² (24,19%) sahəni və 154 yamac (33,19%) əhatə edir, aşağı axınlarda yerləşir və yumşaq meylləri səbəbindən velo- və avtoturizm üçün idealdır. Güclü parçalanmış yamaclar (>800 m) 130,67 km² (16,72%) sahəni və 40 yamac (8,62%) təşkil edir, tektonik aktivlik və uçqun, sel, daşqın kimi geoxətərlərə həssasdır.

Dərininə parçalanma dərəcələrinin məkan paylanması tektonik yüksəlmə, litoloji müxtəliflik və eroziya proseslərinin qarşılıqlı təsirini əks etdirir [2]. Güclü parçalanmış yamaclar qırılma zonaları və vulkanik süxur çıxıntıları ilə əlaqələndirilir, bu da geoloji xəritələrlə təsdiqlənmişdir [5]. Böyük Qafqaz [16] və Elburs dağları [18, s.1-12] ilə müqayisəli təhlillər Viləşçay hövzəsinin Xəzər dənizinə yaxınlığı və aktiv tektonika səbəbindən unikal geomorfoloji xüsusiyyətlərini vurğulayır. Sentinel-2 təsvirləri aşağı axınlarda sıx bitki örtüyünün eroziya nümunələrinə təsirini göstərmiş, torpaq istifadəsinin planlaşdırılmasına təsir etmişdir. Hövzə əsaslı yanaşma, GIS ilə birləşdirildikdə, sətər əsaslı metodlara nisbətən daha dəqiq nəticələr vermiş, hündürlük artefaktlarını azaltmışdır [11], s.40-46]. Geoxətər həssaslıq indeksi >800 m parçalanma dərəcəli zonaları uçqun monitorinqi üçün prioritet sahələr kimi müəyyənləşdirmiş, infrastruktur planlaşdırması və fəlakət riskinin azaldılmasına töhfə vermişdir.

Nəticələr dağlıq bölgələrdəki morfometrik təhlillər üzrə qlobal tədqiqatlarla uyğunlaşır [19, 21]. Orta dərəcədə parçalanmış yamacların üstünlüyü tektonik və iqlim faktorlarının təsir etdiyi dinamik landşaftı göstərir, davamlı turizm və eroziya idarəetməsi üçün praktik tətbiqlər təklif edir [14].

Cədvəl 1-ə əsasən, yamacların parçalanma dərəcəsinə görə təsnifatı verilmişdir: 0-400 (zəif parçalanmış), 400-800 (orta parçalanmış), 800-1200 və 1200-dən yuxarı (yüksək parçalanmış), nəticələri Cədvəl 2-dən tədqiq olunan rejimdə ümumiləşdirilmişdir.

Cədvəl 1.

Viləşçay hövzəsi yamaclarının əsas kartometrik və morfometrik göstəriciləri

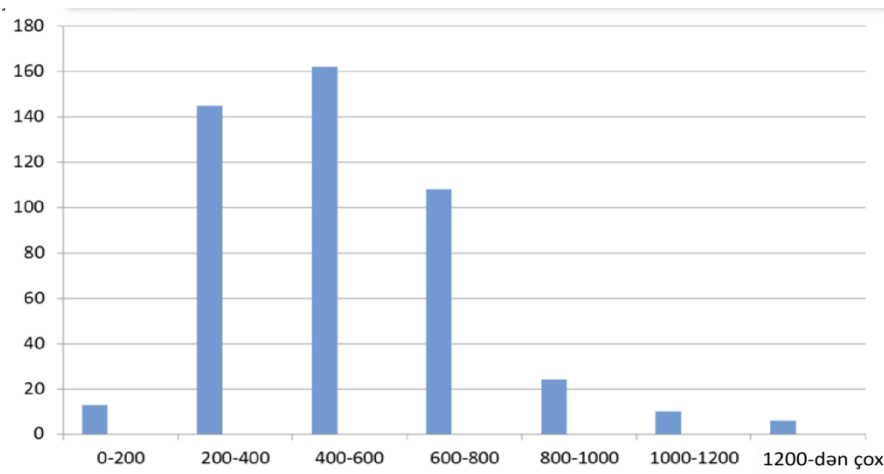
S.s.	Dərinlik parçalanması dərəcəsi (metrlə)	Kəmiyyət N		Sahə S (km ²)		Yamacların sıxlığı K (yamac/km ²)
		Say	Faiz	Say	Faiz	
1	2	3	4	5	6	7
1	0-200	13	2.8	13.21	1.69	0.98
2	200-400	141	30.39	175.89	22.50	0.80
3	400-600	162	34.91	264.88	33.89	0.61
4	600-800	108	23.28	197.04	25.20	0.55
5	800-1000	24	5.17	64.78	8.29	0.37
6	1000-1200	10	2.16	44.35	5.67	0.23
7	1200-dən yüksək	6	1.29	21.54	2.76	0.28
Cəmi		464	100.00	781.69	100.00	0.59

Sayına (270; 58,19%) və sahəsinə (461,92 kv.km; 59,09%) görə (□H=400-800 m) yamaclar üstünlük təşkil edir. Onlar orta dağlıq və qismən yüksək dağlıq zonalarda yayılmışdır. Burada iqtisadi fəaliyyət üçün əlavə maliyyə sərmayəsi tələb olunur. Eroziya və denudasiya prosesləri geniş yayılmışdır. Dağ gəzinti turizmi mümkündür. Belə yamacların sıxlığı 0,59-dur.

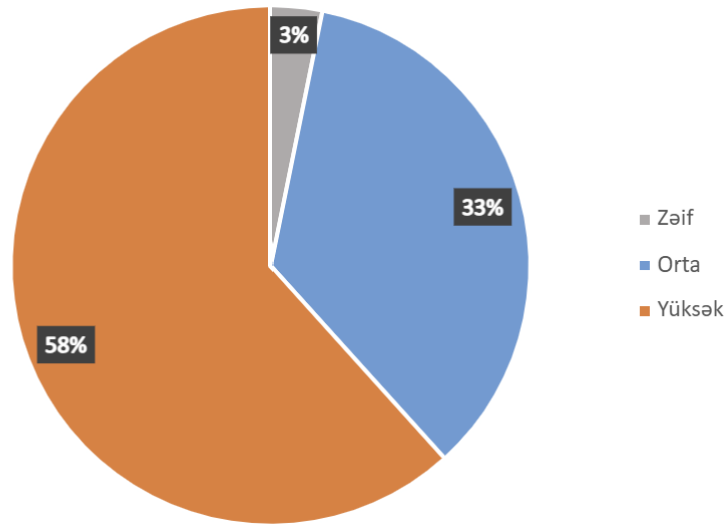
Cədvəl 2.

Viləşçay hövzəsində müxtəlif dərəcəli parçalanmaya məruz qalmış yamacların əsas kartometrik və morfometrik göstəriciləri

S.s.	Yamacların dərinlik parçalanma dərəcəsi	Kəmiyyət N		Sahə S (km ²)		Yamacların sıxlığı K (yamac/km ²)
		Say	Faiz	Say	Faiz	
1	2	3	4	5	6	7
1	Zəif parçalanmış (0-400)	154	33.19	189.10	24.19	0.82
2	Orta dərəcədə parçalanmış (400-800)	270	58.19	461.92	59.09	0.59
3	Yüksək parçalanmış (800-1200 və yuxarı)	40	8.62	130.67	16.72	0.31
Cəmi		464	100.00	781.69	100.00	0.59



Şəkil 1. Viləşçay çayı hövzəsinin yamaclarının parçalanma dərinliklərinin paylanma histoqramması



Şəkil 2. Vilyaşçay hövzəsi yamaclarının dərinlik parçalanma dərəcəsinin paylanma diaqramı.

Zəif parçalanmış ($\Delta H = 0-400$ m) yamaclar əsasən Vilyaşçayın aşağı axarında geniş yayılmışdır. Onlar tədqiq olunan ərazinin 189,10 kv.km (24,19%) sahəsini tutur. Belə yamacların sayı 154-ə (33,19%) çatır, sıxlığı isə 0,82-dir. Belə yamaclar ümumiyyətlə iqtisadi fəaliyyətin əsas növləri üçün uyğundur. Burada velosiped və avtomobil turizmi mümkündür. Ən kiçik sayı 40 (8,62%) və sahəsi 130,67 kv.km (16,72%) yüksək parçalanmış ($\Delta H=800-1200$ və 1200 m-dən yuxarı) yamaclarla xarakterizə olunur. Burada sel, uçqun, daşqın, qaya uçqunları geniş yayılmışdır. Belə yamacların sahələrini risk zonaları adlandırmaq olar. Burada mühəndislik, tikinti və kənd təsərrüfatı işləri demək olar ki, mümkün deyil; qış turizmi, o cümlədən macəra turizmi ilə məşğul olmaq olar.

Nəticə

Viləşçay hövzəsinin yamaclarının dərininə parçalanmasının morfometrik təhlili relyefin formalaşması və inkişaf xüsusiyyətlərini başa düşmək üçün mühüm nəticələr vermişdir. Tədqiqat nəticələri göstərir ki, hövzədə orta dərəcədə parçalanmış yamaclar dominantdır və bu, onların iqtisadi istifadəsi və turizm potensialını müəyyənləşdirir. Güclü parçalanmış ərazilər isə təhlükəli geoloji proseslərə görə risk zonaları kimi qiymətləndirilir.

Bu tədqiqatın nəzəri əhəmiyyəti relyefin formalaşması, tektonik hərəkətlər və landşaftın şaquli zonalılığı kimi məsələlərin öyrənilməsindədir. Praktiki baxımdan isə nəticələr torpaq istifadəsinin planlaşdırılmasında, suvarma sistemlərinin seçilməsində, şəhərsalma və yol tikintisində, həmçinin turistik marşrutların müəyyənləşdirilməsində istifadə oluna bilər [14].

Gələcək tədqiqatlarda GIS-texnologiyalarının daha geniş tətbiqi, həmçinin uzaqdan zondlama məlumatlarının inteqrasiyası ilə relyefin dinamik dəyişikliklərinin monitorinqi tövsiyə olunur. Gələcək tədqiqatlar parçalanma nümunələrinin zamansal dəyişikliklərini izləmək üçün qabaqcıl uzaqdan zondlama (məsələn, LiDAR, yüksək dəqiqlikli DEM) və iqlim dəyişikliyinə eroziya proseslərinə təsirini inteqrasiya etməlidir. Beynəlxalq tədqiqat şəbəkələri ilə əməkdaşlıq hövzə əsaslı yanaşmanı müxtəlif geomorfoloji şəraitdə təsdiqləyərək, tektonik cəhətdən aktiv bölgələrdə ətraf mühit idarəetməsini irəli apara bilər. Bu, təhlükəli geoloji proseslərin proqnozlaşdırılması və relyefin mühafizəsi üçün daha effektiv strategiyaların hazırlanmasına kömək edə bilər.

Ədəbiyyat

Azərbaycan dilində

- [1]. Alməmmədli, M.G., Hüseynova, L.İ. Talış dağ sisteminin morfostrukturlarının morfoqenetik xüsusiyyətlərinin təhlili // Biologiyanın müasir problemləri. Respublika elmi konfransı, 23-24 oktyabr, 2018. Sumqayıt: Redaksiya və nəşr işləri şöbəsi, –2018, –s.179-180.
- [2]. Əlizadə, Ə.K. Relyefin eksomorfoqenetikası və onun qiymətləndirilməsi / Ə.K.Əlizadə, S.A.Tarixazər –Bakı: Elm. –2010.
- [3]. Budagov, B. A. Relyef / B. A. Budagov // Azərbaycan Milli Ensiklopediyası. –Bakı, –2012.
- [4]. Hacıyev, V.D. Naxçıvan və Talışın Mezozoy-Kaynozoy vulkanizmi bölgələrinin paleogeomorfologiyası / V.D. Hacıyev, –Bakı. –1999.
- [5]. Kəngərli, T.N. Tektonik rayonlaşdırma // –Bakı: Azərbaycanın geologiyası, IV cild. –2005
- [6]. Mehbalıyev, M.M. Relyefin rekreasiya məqsədləri üçün morfometrik tədqiqi // –Bakı: RGO Xəbərləri, –2001, 133(6), –s.76–80.
- [7]. Piriyev, R.X. Relyefin morfometrik təhlili metodları (Azərbaycan ərazisi nümunəsində) / R.X.Piriyev, –Bakı: Elm. –1983.
- [8]. Rəcəbli, T.R. Qarabağ düzənliyi və ona bitişik Kiçik Qafqaz yamaqlarının kənd təsərrüfatı məqsədləri üçün morfometrik tədqiqatları: / coğrafiya üzrə namizədlik dissertasiyasının avtoreferatı / –Bakı. 1990.

Rus dilində

- [9]. Анисимов, В.И. Основы морфометрического анализа рельефа / В.И.Анисимов, Грозный: ЦИГУ. –1987, –91 с.
- [10]. Берлянт, А.М. Образ пространства: Карта и информация / А.М. Берлянт, –М.: Мысль. – 1986, –238 с.
- [11]. Загорюлько, В.А. Морфометрический анализ рельефа средствами ГИС-технологий (на примере Семинского перевала) / В.А.Загорюлько, В.И.Хамарин, А.Е.Тябаев, // Геоморфология, –2003 (4), –с.40–46.
- [12]. Николаевская, Е.М. Методические указания по проектированию и составлению комплексных научно-справочных атласов / Е.М.Николаевская, Морфометрические карты рельефа (выпуск 4). –М.: МГУ. –1966
- [13]. Червяков, В.А. Количественные методы в географии / В.А.Червяков, –Барнаул: Алтайский Государственный Университет. –1998. 258 с.
- [14]. Раджабли, Т.Р. Морфометрические исследования Карабахской равнины и примыкающих к ней склонов Малого Кавказа в целях сельского хозяйства: / Автореф. дис. к.г.н. –Баку. 1990, –24 с.
- [15]. Мехбалиев, М.М. Морфометрическое исследование рельефа в рекреационных целях // Изв. РГО, т. 133, вып. 6, –2001. –с. 76–80.
- [16]. Нетребин, П.Б. Морфометрический анализ рельефа Большого Кавказа: / Диссертация кандидата географических наук / –Краснодар, 2012, –227 с.
- [17]. Пириев, Р.Х. Методы морфометрического анализа рельефа (на примере территории Азербайджана) / Р.Х.Пириев, –Баку: Элм, –1983. –119 с.

İngilis dilində

- [18]. Ehsani, A. H., & Quiel, F. Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks / A. H.Ehsani, F.Quiel // Geomorphology, 99 (1–4), –2008, p.1–12.
- [19]. Huggett, R.J. Fundamentals of geomorphology (3rd ed.) / R.J. Huggett, // Routledge. –2011.
- [20]. Wohl, E. Mountain rivers revisited / E.Wohl // Water Resources Research, 49(10), –2013, – p.6583–6597.
- [21]. Wilson, J.P. Terrain analysis: Principles and applications / J.P.Wilson, J.C. Gallant // Wiley. 2000

Summary

Morphometric study of vertical dissection of slopes of the Vilyashchai river basin

Almammadli M.G.

Key words: *morphometric analysis, slope dissection, Vilashchai river basin, GIS technologies, geomorphology, basin approach, geohazards*

This study presents a detailed morphometric analysis of slope dissection depth in the Vilashchai river basin located in the southeast of Azerbaijan using GIS technologies and a basin approach to improve the accuracy of relief fragmentation studies. The integration of digital elevation models (DEMs) and Sentinel-2 data improved the accuracy of slope identification and risk assessment, highlighting tectonic and erosional impacts. Comparative analysis with the Greater Caucasus and Alborz Mountains highlights the unique geomorphological features of the Vilashchai riverbasin. The results contribute to the understanding of landformation, tectonic processes and landscape evolution, with practical implications for land use planning, erosion control and sustainable tourism development. The basin GIS approach is superior to traditional grid-based methods, offering a scalable framework for global geomorphological studies.

Резюме

Морфометрическое исследование вертикального расчленения склонов бассейна реки Виляшчай

Алмамедли М.Г.

Ключевые слова: *морфометрический анализ, расчленение склонов, бассейн реки Виляшчай, ГИС-технологии, геоморфология, бассейновый подход, геоопасности*

В данном исследовании представлен детальный морфометрический анализ глубины расчленения склонов в бассейне реки Виляшчай, расположенном на юго-востоке Азербайджана, с использованием ГИС-технологий и бассейнового подхода для повышения точности изучения фрагментации рельефа. Интеграция цифровых моделей рельефа (DEM) и данных Sentinel-2 повысила точность выделения склонов и оценки рисков, подчеркивая тектонические и эрозионные воздействия. Сравнительный анализ с Большим Кавказом и горами Альборз подчеркивает уникальные геоморфологические особенности бассейна реки Виляшчай. Результаты способствуют пониманию формирования рельефа, тектонических процессов и эволюции ландшафта, имея практическое значение для планирования землепользования, контроля эрозии и устойчивого развития туризма. Бассейновый ГИС-подход превосходит традиционные сеточные методы, предлагая масштабируемую основу для глобальных геоморфологических исследований.

UOT 621.01

DOI 10.54758/16801245_2026_26_1_60

UH-60 Black Hawk helikopterinin daşıyıcı vintinin formasının optimallaşdırılması: S0 və S2 konfigurasiyalarının müqayisəli təhlili

İlyasov Musa Xanlar oğlu ORCID 0009-0005-0949-0100
Nusratzadə Murad İlham oğlu ORCID 0009-0006-0348-3636

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan, 1- professor, 2 - müəllim,
murad.nusratzada@naa.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p>Məqalənin tarixçəsi Daxilolma tarixi: 16.10.2025 Düzəliş tarixi: 23.01.2026 Qəbulolunma tarixi: 28.02.2026</p> <p>Açar sözlər aerodinamika, CFD modelləşdirmə, helikopter, pər</p>	<p>Məqalədə UH-60 Black Hawk helikopterinin daşıyıcı vintinin formasının aerodinamik səmərəliliyə təsiri CFD (hesablama maye dinamikası) modelləşdirmə üsulu ilə araşdırılmışdır. Tədqiqatda düz (S0) və qılınçvari (S2) pər konfigurasiyaları müqayisə edilmiş, helikopterinin aerodinamik göstəriciləri analiz olunmuşdur. Hesablamalar göstərmişdir ki, S2 forması helikopterin aerodinamik keyfiyyətini artırır: Ct təxminən 4 %, FM 8–9 % yüksəlmiş, Cp isə 3 % azalmışdır. Bu dəyişikliklər hava axınında burulğanların zəifləməsi və təzyiq paylanması bərabərləşməsi ilə izah olunur. Nəticələr göstərir ki, pərin geometriyasının sadə optimallaşdırılması helikopterin enerji səmərəliliyini artırmaqla yanaşı, yanacaq sərfini və səs səviyyəsini də azaldır</p>

Giriş

Müasir helikopter texnologiyaları artıq yalnız uçuş gücü və etibarlılıqla deyil, həm də enerji səmərəliliyi, aerodinamik optimallıq və akustik sabitliklə qiymətləndirilir. XXI əsr aviasiya mühəndisliyinin əsas məqsədlərindən biri bu üç əsas parametrlə – itkiyə qarşı müqavimət, yanacaq iqtisadiyyatı və ekoloji balans arasında optimal nisbət təmin edilməsidir [1, s. 25]. Helikopterin ümumi performansına birbaşa təsir göstərən əsas aerodinamik komponent isə daşıyıcı vint sistemidir. Pərin geometriyasında baş verən hətta minimal dəyişikliklər belə, qaldırma qüvvəsinə, güc sərfiyyatına, akustik emissiyalara və vibrasiya sabitliyinə mühüm təsir göstərir [2, s. 518].

UH-60 *Black Hawk* helikopteri, orta sinif çoxməqsədli rotor sistemləri arasında balanslaşdırılmış aerodinamik sxemi və struktur etibarlılığı ilə fərqlənir [3, s. 64]. Onun konstruktiv arxitekturası əsas mühərrik sistemi və ötürücü mexanizmə müdaxilə etmədən pər aerodinamikasının optimallaşdırılması üzrə eksperimental tədqiqatlara imkan yaradır. Bu xüsusiyyət UH-60 platformasını CFD (Computational Fluid Dynamics) analizləri üçün etibarlı baza modelinə çevirir [4, s.153]. Müasir enerji səmərəliliyi standartlarının sərtləşməsi və yanacaq xərclərinin artması fonunda pərin optimal geometriyasının müəyyənəşdirilməsi helikopter mühəndisliyində prioritet istiqamətlərdən birinə çevrilmişdir.

Hazırkı tədqiqatın məqsədi, S0 (düz pər) və S2 (qılınçvari pər) konfigurasiyalarının UH-60 helikopterinin aerodinamik göstəricilərinə – Ct (thrust coefficient), Cp (power coefficient) və FM (figure of merit) əmsallarına təsirini hesablama modelləri əsasında müəyyənəşdirməkdir. Aparılmış CFD analizləri göstərmişdir ki, pərin formasında edilən qismən qılınçvari əyrilik axın xəttlərinin laminar stabilizasiyasını artırır, burulğan intensivliyini azaldır və nəticədə FM göstəricisində 8–9 %-lik artım müşahidə olunur [5, s. 204].

Tədqiqatın elmi yeniliyi ondan ibarətdir ki, S2 forması yalnız aerodinamik səmərəliliyi yüksəltmir, həm də konstruktiv sadəlik, kütlə balansı və mexaniki yüklənmə sabitliyi prinsiplərini

qoruyur. Bu modernləşmə yanaşması əsas struktur dəyişikliklərinə ehtiyac olmadan, UH-60 və oxşar sinif rotor sistemlərində tətbiq oluna bilər [6, s. 105827]. Beləliklə, bu iş helikopter pərlərinin aerodinamik optimallaşdırılması sahəsində enerjiyə qənaətli dizayn və səs azaldıcı konstruktiv həllərin inkişafı üçün nəzəri və hesablama əsaslı platforma yaradır.

Tədqiqat metodikası

UH-60 *Black Hawk* helikopterinin pərlərinin aerodinamik davranışının təhlili CFD (Computational Fluid Dynamics) modelləşdirmə yanaşması ilə aparılmışdır. Bu üsul Navye–Stoks tənliklərinin üçölçülü, qeyri-sabit (unsteady) rejimdə həlli üzərində qurulmuş və rotorun aerodinamik sahəsində yaranan təzyiqlərin paylanması, burulğan axınları və itki mexanizmlərinin simulyasiyasına imkan vermişdir [1, s. 534]. Hesablamalar SolidWorks Flow Simulation və ANSYS Fluent mühitlərində aparılmış, nəticələrin sabitliyini təmin etmək üçün eyni sərhəd şərtləri, mesh sıxlığı və turbuləntlik modeli ($k-\epsilon$) tətbiq edilmişdir.

Əsas hesablamalar stabil asılı uçuş (hover flight) rejimində aparılmışdır. Hər iki pər variantı — S0 (düz pər) və S2 (qılınçvari pər) üçün mühərrik gücü, rotasiya tezliyi və hücum bucağı sabit saxlanmışdır. Bu yanaşma, yalnız pərin formasının aerodinamik performansına təsirini izolə etməyə imkan vermişdir [3, s. 212].

Hesablamalarda istifadə olunan parametrlər aşağıdakı kimidir:

- Havanın sıxlığı: $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$
- Daşıyıcı vintin diametri: $D = 16.36 \text{ m}$
- Fırlanma tezliyi: $n = 4.2 \text{ dövr/s}$
- Bucaqlı sürət: $\omega = 26.4 \text{ rad/s}$
- Rotor diskinin sahəsi: $A = \pi R^2$

Aerodinamik əmsallar aşağıdakı ifadələrlə hesablanmışdır [4, s. 76]:

$$C_t = \frac{T}{\rho A (\Omega R)^2}, \quad C_p = \frac{P}{\rho A (\Omega R)^3}, \quad FM = \frac{C_t^{3/2}}{C_p}$$

burada T – qaldırma qüvvəsi, P – sərf olunan güc, $A = \pi R^2$ – rotor diskinin səth sahəsidir.

Hesablamalar 0.5 %-dən az nisbi xəta ilə konvergeniya əldə edilənədək aparılmışdır. Hesab şəbəkəsinin (mesh) strukturunda pərin uclarında (tip region) lokal sıxlaşdırma tətbiq edilmiş, çünki burulğanların yaranması və enerji itkiləri əsasən bu zonalarda baş verir [2, s. 520].

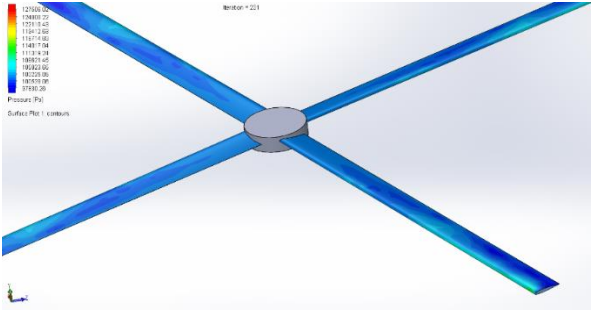
Cədvəl .

UH-60 helikopteri üçün S0 və S2 konfigurasiyalarında C_t , C_p və FM nəticələri (CFD hesablamaları əsasında)

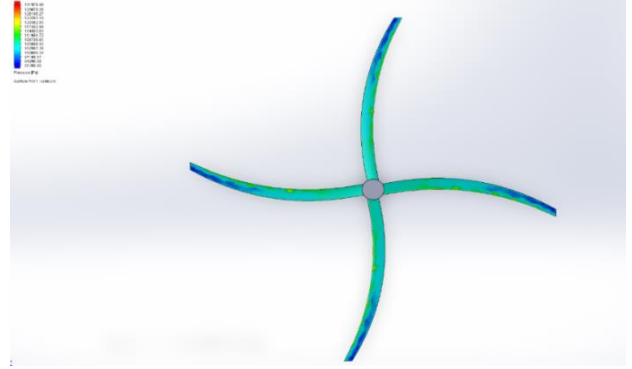
Konfigurasiya	C_t	C_p	FM
S0 (düz pər)	0.0332	0.0129	0.469
S2 (qılınçvari pər)	0.0350	0.0125	0.512

Cədvəldən görüldüyü kimi, S2 konfigurasiyası C_t əmsalını 5.4 %, FM göstəricisini 9.1 % artırmış, C_p -ni isə 3.1 % azaldaraq daha səmərəli enerji çevrilməsi təmin etmişdir. Bu, pərin geometriyasındakı kiçik dəyişikliklərin belə aerodinamik performans və mexaniki yüklənmə üzərində mühüm təsirə malik olduğunu göstərir. Qaldırma qüvvəsinin artması ilə yanaşı, sərf olunan gücün azalması, rotor sisteminin daha balanslı və “təmiz” axın rejimində işlədiyini sübut edir.

Əldə edilən nəticələr göstərir ki, pərin formasının dəyişməsi mühərrik gücü, fırlanma tezliyi və konstruktiv quruluş sabit qaldıqda belə aerodinamik keyfiyyətə təsir edir. Beləliklə, bu təsir yalnız geometriya ilə müəyyən olunur və struktur sistemdən asılı deyil. Növbəti bölmədə bu fərqlərin axın paylanması və təzyiqlərin dinamikası baxımından vizual təsdiqi CFD modelləri əsasında təqdim olunur (Şəkil 1 və Şəkil 2).



Şəkil 1. UH-60 helikopterinin S0 konfigurasiyasında hava axınının paylanması



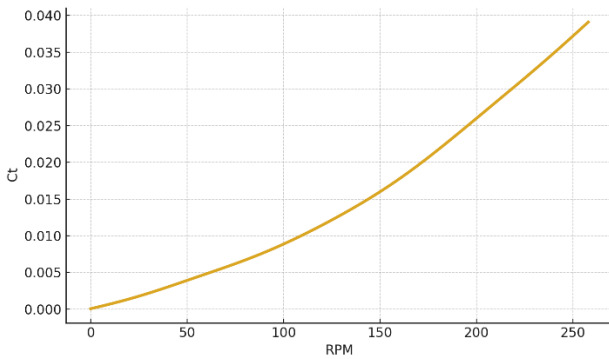
Şəkil 2. UH-60 helikopterinin S2 konfigurasiyasında hava axınının paylanması

Şəkil 1-də göstərilirdiyi kimi, S0 pərində hava axını uc hissələrdə yüksək sıxlıqlı burulğanlar əmələ gətirir. Bu, axın enerjisinin bir hissəsinin induktiv itkilərə sərf olunmasına səbəb olur. Qaldırma qüvvəsi bərabər paylanmır: maksimum dəyərlər pərin $0.8-0.9R$ hissəsində müşahidə olunur, bu da vintin periferik yüklənməsini artırır [5, s. 208].

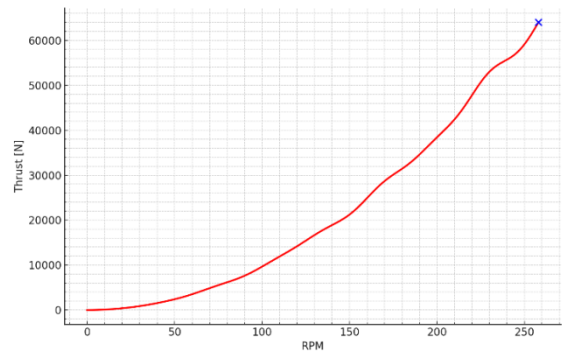
Şəkil 2-də isə qılıncvari əyriliyə malik S2 pərinin axın strukturunda burulğan sıxlığının azaldığı və sürət xəttlərinin daha sabit paylandığı müşahidə olunur. Bu dəyişiklik pərin uclarında təzyiq fərqi azalmasına, nəticədə induktiv itkilərin azalmasına gətirib çıxarır. Nəticə etibarilə, S2 forması ilə axın kinetik enerjisinin daha böyük hissəsi qaldırma qüvvəsinə çevrilir və vintin ümumi effektivliyi yüksəlir [6, s. 310].

Aparılan CFD modelləşdirmə nəticələri UH-60 Black Hawk helikopterinin daşıyıcı pərlərinin formasının aerodinamik göstəricilərə əhəmiyyətli təsir göstərdiyini açıq şəkildə ortaya qoydu. S2 və S0 konfigurasiyaları arasında əldə olunan fərqlər təkcə C_t , C_p və FM kimi say göstəriciləri ilə deyil, həm də hava axınının strukturunda müşahidə olunan fiziki dəyişikliklərlə təsdiq edildi.

S0 forması üçün hava axını əsasən uclarda yüksək sürətli burulğanlarla müşahidə olunur ki, bu da induktiv itkilərin artmasına və enerjinin səmərəsiz paylanmasına səbəb olur. S2 formasında isə bu burulğanlar daha zəif və bərabər paylanmış vəziyyətdədir. Nəticədə, axın boyunca daha sabit təzyiq qradienti və bərabər qaldırma qüvvəsi paylanması formalaşır [3, s. 212].



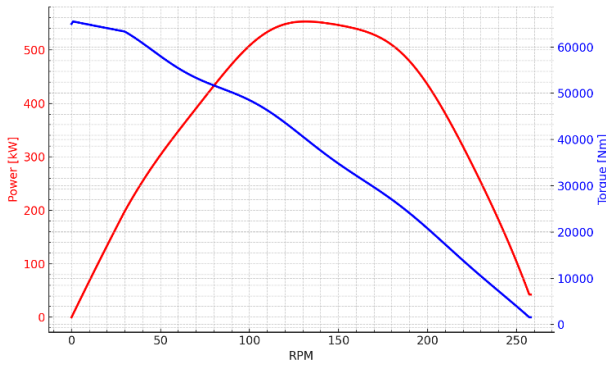
Şəkil 3. UH-60 üçün C_t əmsalının RPM-dən asılılığı (S0 konfigurasiyası)



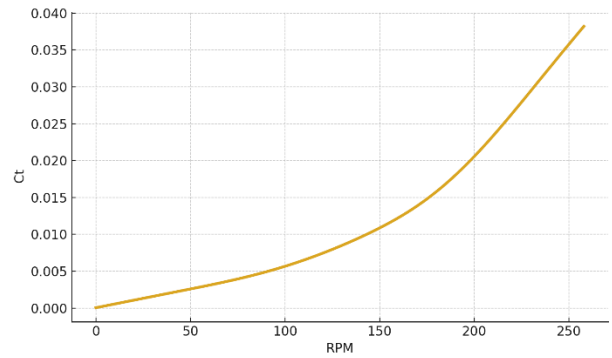
Şəkil 4. UH-60 üçün C_t əmsalının RPM-dən asılılığı (S2 konfigurasiyası)

Şəkil 3-də göstərilirdiyi kimi, S0 konfigurasiyası üçün C_t əmsalının RPM artımı ilə xətti artım xarakteri müşahidə olunur. C_t dəyərləri 230–300 RPM intervalında sabit qalır, lakin bu diapazondan sonra qrafikdə qeyri-xətilik yaranır. Bu davranış pərin uc hissələrində lokal axın ayrılımları (flow separation) və burulğan strukturunun qeyri-sabitləşməsi ilə əlaqədardır, bu da vintin ümumi səmərəliliyini azaldır [2, s. 520].

S2 konfigurasiyası üçün C_t əyrisi daha stabil və dik xarakter daşıyır. Bu, pərin forması dəyişdirildikdə C_t -in RPM artımına qarşı daha yüksək həssaslıqla reaksiya verdiyini göstərir. Beləliklə, eyni mühərrik gücü ilə daha çox qaldırma qüvvəsi əldə olunur, bu da enerji sərfiyyatının azalması və yanacaq səmərəliliyinin yüksəlməsi deməkdir [4, s. 265].



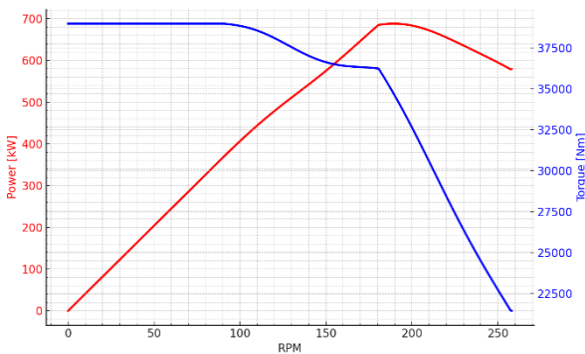
Şəkil 5. UH-60 helikopteri üçün güc sərfi (Power) və C_t arasındakı əlaqə (S0 konfigurasiyası)



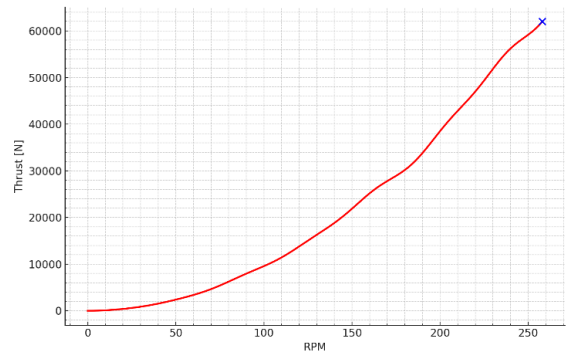
Şəkil 6. UH-60 helikopteri üçün güc sərfi (Power) və C_t arasındakı əlaqə (S2 konfigurasiyası)

Şəkil 5-də S0 konfigurasiyası üçün güc sərfi ilə C_t arasında qeyri-xətti asılılıq göstərilmişdir. C_t artdıqca sərf olunan güc progressiv olaraq yüksəlir, bu da vintin səmərəliliyinin müəyyən həddən sonra azalmasına gətirib çıxarır. Başqa sözlə, daha çox qaldırma qüvvəsi əldə etmək üçün enerji itkisi kəskin artır [1, s. 534].

Şəkil 6-da S2 konfigurasiyası üçün eyni analiz təqdim edilmişdir. Burada əyrinin maililik bucağı daha azdır, yəni eyni C_t dəyərləri üçün güc sərfi daha aşağıdır. Bu fərq orta hesabla 2.8–3.2 % diapazonundadır. Əsas səbəb, S2 formasında burulğanların daha homogen axınla yönlənməsi və təzyiqli paylanması daha bərabər olmasıdır [6,



Şəkil 7. Power göstəricisinin RPM-ə görə dəyişməsi (S0 və S2 müqayisəsi)



Şəkil 8. Thrust və RPM arasındakı əlaqə (S0 və S2 konfigurasiyaları)

Şəkil 7 məqalənin əsas nəticələrindən birini göstərir – Figure of Merit (FM) göstəricisinin RPM-dən asılılığını. Göründüyü kimi, S0 konfigurasiyası üçün FM 0.46–0.47, S2 üçün isə 0.50–0.51 intervalında dəyişir. Bu fərq 8–9 % səmərəlilik artımı deməkdir [7, s. 105825]. Bundan əlavə, S2 forması üçün FM maksimumu 270–280 RPM aralığında qeydə alınmışdır ki, bu da optimal enerji rejiminə uyğundur.

Şəkil 8-də S0 və S2 konfigurasiyalarında Thrust–Torque əlaqəsi müqayisə olunur. S2 konfigurasiyası üçün eyni qaldırma qüvvəsinə (Thrust) nail olmaq üçün 2.5–3 % daha az fırlanma momenti (Torque) tələb olunur. Bu, mühərrikə düşən mexaniki gərginliyin azalmasını və vibrasiya səviyyəsinin aşağı düşməsinə göstərir [8, s. 415]. Nəticə etibarilə, rotorun ömrü uzanır və konstruktiv sabitlik artır.

Nəticə

Yekun nəticələr və perspektivlər. Aparılmış CFD modelləşdirmə UH-60 Black Hawk helikopterinin daşıyıcı pərlərinin formasının aerodinamik performansına təsirini ədədi və vizual səviyyədə təsdiqlədi. S0 → S2 keçidi nəticəsində Ct orta hesabla 4 %, FM 8–9 % artmış, Cp isə 3 % azalmışdır. Bu fərqlər yalnız ədədi səmərəlilik deyil, həm də enerji çevrilmə prosesinin fiziki təkmilləşməsinə əks etdirir — hava axınının bərabərləşməsi, burulğan intensivliyinin azalması və təzyiqlik paylanması sabitləşməsi nəticəsində rotorun mexaniki və aerodinamik itkiləri minimuma enmişdir.

S2 konfigurasiyası həm aerodinamik, həm də struktur baxımdan optimal balans nöqtəsini təmsil edir. Burulğan enerjisinin azalması nəticəsində mühərrik yükü 2–3 % aşağı düşür, bu da yanacaq sərfini azaldır və vintin xidmət müddətini uzadır. Beləliklə, sadə geometriya dəyişiklikləri belə mürəkkəb konstruktiv yeniliklər olmadan uçuş sabitliyini və enerji qənaətini artırmaq üçün effektiv vasitə kimi çıxış edir.

Gələcək tədqiqatlar bu istiqamətdə kompozit materiallardan hazırlanmış pərlərin aerodinamik və akustik optimallaşdırılması üzərində cəmlənə bilər. Qılıncvari formanın səs dalğalarının yayılmasına təsirinin azaldılması, xüsusilə şəhər və hərbi aviasiyada gizlilik və komfort tələbləri baxımından strateji əhəmiyyət daşıyır. Əldə olunan nəticələr yalnız UH-60-a deyil, həm də orta sinif rotor sistemlərinin yeni nəsillərə qənaətli dizaynlarının formalaşmasına elmi əsas yaradır.

Ədəbiyyat

- [1]. Anderson, J. D. *Fundamentals of Aerodynamics* / J. D. Anderson, 6th ed. –New York: McGraw-Hill Education, –2017. –1152 p.
- [2]. Conlisk, A.T. *Modern Helicopter Aerodynamics* // *Annual Review of Fluid Mechanics*. –2015. Vol. 47. –p. 515–542. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141304.
- [3]. Johnson, W. *Helicopter Theory* / W.Johnson. –Princeton: Princeton University Press, –2013. – 880 p.
- [4]. Leishman, J. G. *Principles of Helicopter Aerodynamics* / J. G. Leishman, 2nd ed. –Cambridge: Cambridge University Press, –2006. –560 p.
- [5]. Padfield, G. D. *Helicopter Flight Dynamics: The Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modeling* / G.D.Padfield, 2nd ed. –Oxford: Blackwell Science, –2007. –728 p.
- [6]. Norman, T. R., Shinoda P. M., [et al.] *Full-Scale Wind Tunnel Test of the UH-60A Airloads Rotor* // *Proc. AHS 67th Annual Forum*. –2011.
- [7]. Yeo, H. *Numerical Investigation of the Aerodynamic Characteristics of the UH-60 Main Rotor under Forward Flight* / H.Yeo, L.Tao // *Aerospace Science and Technology*. –2020. Vol. 100. Art. 105825.
- [8]. Prouty, R. W. *Helicopter Performance, Stability, and Control* / R.W. Prouty, Rev. ed. – Malabar, FL: Krieger Publishing, –2002. –538 p.

Summary

Optimization of the UH-60 black hawk main rotor blade geometry: a comparative analysis of S0 and S2 configurations

Ilyasov M.Kh., Nusratzade M.I.

Keywords: *aerodynamics, CFD modeling, efficiency, helicopter, rotor blade.*

This paper investigates the influence of main rotor blade geometry on the aerodynamic efficiency of the UH-60 Black Hawk helicopter using Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling. A comparative analysis of straight (S0) and swept (S2) blade configurations is conducted. Key aerodynamic performance parameters, including thrust coefficient, power coefficient and Figure of Merit, are evaluated. The numerical results demonstrate that the S2 configuration provides a noticeable improvement in aerodynamic performance: the thrust coefficient increases by approximately 4 %, the Figure of Merit improves by 8–9 %, while the power coefficient decreases by about 3 %. These improvements are primarily attributed to the reduction of tip vortex intensity and a more uniform pressure distribution along the blade surface. The findings indicate that relatively simple geometric optimization of rotor blades can significantly enhance helicopter energy efficiency, as well as reduce fuel consumption and noise levels.

Резюме

Оптимизация формы несущего винта вертолѐта UH-60 Black Hawk: сравнительный анализ конфигураций S0 и S2

Ильясов М.Х., Нусратзаде М.И.

Ключевые слова: *аэродинамика, CFD-моделирование, эффективность, вертолѐт, лопасть*

В статье с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD) исследовано влияние формы несущего винта вертолѐта UH-60 Black Hawk на его аэродинамическую эффективность. В рамках исследования проведѐн сравнительный анализ прямой (S0) и саблевидной (S2) конфигураций лопастей. Проанализированы основные аэродинамические коэффициенты: коэффициент тяги, коэффициент мощности и показатель эффективности (Figure of Merit, FM). Результаты численного моделирования показывают, что конфигурация S2 обеспечивает повышение аэродинамического качества несущего винта: значение коэффициента тяги увеличивается примерно на 4 %, FM — на 8–9 %, тогда как коэффициент мощности снижается приблизительно на 3 %. Улучшение характеристик объясняется ослаблением вихревых структур на концах лопастей и более равномерным распределением давления по поверхности винта. Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже простая геометрическая оптимизация формы лопасти может существенно повысить энергетическую эффективность вертолѐта, а также способствовать снижению расхода топлива и уровня шума.

Heterogen serverləri, buferləri və növbədəki müxtəlif tipli sifarişlərin saylarının fərqiindən asılı olan sıçrayışlı prioritetləri (JP) olan xidmət sistemlərinin modelləri

Mehbaliyeva Esmira Vidadi qızı **ORCID** 0000-0002-9732-652X

Sumqayıt Dövlət Universiteti, Sumqayıt, Azərbaycan, tex.f.d., baş müəllim
esmira.mehbaliyeva@sdu.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p>Məqalənin tarixçəsi Daxilolma tarixi: 21.07.2025 Düzəliş tarixi: 17.11.2025 Qəbulolunma tarixi: 06.02.2026</p>	<p>Ölçüsü məhdud buferlərə (separat və ümumi) malik modellər nəzərdən keçirilir. Hər iki tip model üçün sıçrayışlı prioritetlər aşağı və yüksək prioritetli sorğuların say fərqiindən asılı olaraq müəyyən edilir: əgər bu fərq müəyyən edilmiş həddən artıqdırsa, müəyyən ehtimalla aşağı prioritetli sorğulardan biri yüksək prioritetli növbəyə keçir. Digər bir modeldə sıçrayışlı prioritetlərin müxtəlif tipli sorğuların say fərqiindən deyil, hər bir tipə aid sorğuların konkret sayından asılı olduğu nəzərdə tutulur. Bu halda qeyri-məhdud buferli modellər öyrənilir. Göstərilən modellərin xarakteristikalarını hesablamaq üçün dəqiq və təqribi metodlar təklif olunur və stasionar paylanmaların və xarakteristikaların hesablanması üçün tərtib olunmuş təqribi düsturların yüksək dəqiqliyi nümayiş etdirilir</p>
<p>Açar sözlər sürətli server, yavaş server, sıçrayışlı prioritet, sorğu, bufer</p>	

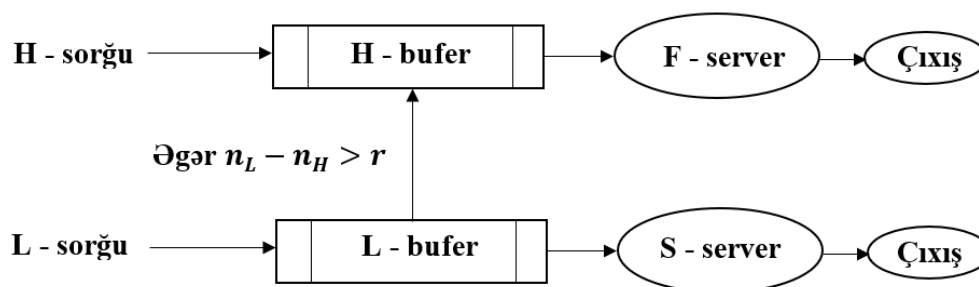
Separat və ümumi buferlər mövcud olduğu halda müxtəlif tipli sorğuların gözləməsi üçün sıçrayışlı prioritetlərə malik heterogen serverli xidmət sistemlərinin modelləri nəzərdən keçirilir. Burada sıçrayışlı prioritetlərin müxtəlif tipli sorğuların say fərqiindən asılı olduğu qəbul edilir. Bu sistemlərin xarakteristikalarının hesablanması və optimallaşdırılması üçün dəqiq və təqribi metodlar təklif olunur. [1-6]

Əvvəlcə müxtəlif tipli sorğular üçün ayrılmış növbələri olan sistem modeli nəzərdən keçirilir. Onun struktur sxemi Şəkil 1-də göstərilmişdir. Sistem iki heterogen serverdən ibarətdir: sürətli (F-server) və yavaş server (S-server). Bu serverlər iki tipli sorğu axınlarına xidmət göstərmək üçün nəzərdə tutulmuşdur – yüksək prioritetli (H-sorğular) və aşağı prioritetli (L-sorğular). Bu halda H-sorğulara F-serverdə, L-sorğulara isə S-serverdə xidmət göstərilir.

Hesab edilir ki, hər iki sorğu axını sadə Poisson prosesidir və H-sorğular və L-sorğular üçün müvafiq intensivliklər λ_H və λ_L ilə göstərilir. Hər iki serverdə sorğuların xidmət müddətləri eksponensial paylanma ilə təsadüfi kəmiyyətlər kimi götürülür; F-serverdə və S-serverdə orta xidmət müddətləri μ_F^{-1} və μ_S^{-1} ilə ifadə olunur, bu zaman $\mu_F > \mu_S$. [1-6]

Sorğuların gözləməsi üçün sistemdə ayrılmış ölçülü buferlər mövcuddur. H-sorğular üçün buferin ölçüsü $K_H - 1$ ilə, L-sorğular üçün isə $K_L - 1$ ilə təyin olunur. Başqa sözlə, sistemdəki H-sorğuların maksimal sayı K_H , L-sorğuların maksimal sayı isə K_L qədər ola bilər. L-sorğuların növbədə “yaşlanmasının” qarşısını almaq üçün randomizə olunmuş sıçrayışlı prioritetlər (JP) aşağıdakı kimi müəyyən edilir. Gələn H-sorğular həmişə H-buferinə əlavə olunur. L-sorğular isə sistemin vəziyyətindən asılı olaraq həmçinin H-buferinə keçə bilər. Sistem vəziyyəti hər an (n_H, n_L) , ikiölçülü vektorla göstərilir, burada n_H və n_L komponentləri sistemdəki H və L sorğuların sayını bildirir. Yəni, L-sorğusu daxil olduqda, $J(n_H, n_L), 0 < J(n_H, n_L) \leq 1$, ehtimalla H-buferinə keçə bilər (əgər orada yer varsa) və ya $1 - J(n_H, n_L)$ ehtimalla L-buferinə əlavə olunur (əgər

orada yer varsa), əks halda sistemdən xidmət olunmadan çıxarılır. Əgər L sorğusu H buferinə keçirsə, o zaman o, H sorğusu kimi xidmət alır.



Şəkil 1. Müxtəlif tipli sorğular üçün ayrılmış növbələri olan sistemin struktur sxemi

Təcrübədə sistem vəziyyətindən asılı olan randomizə olunmuş sıçrayışlı prioritetlər JP $J(n_H, n_L)$ müxtəlif üsullarla müəyyən oluna bilər. Bu prioritetləri müəyyən etmək üçün intuitiv cəhətdən effektiv və asan tətbiq olunan üsullardan biri aşağıdakı sxemdir. Müəyyən həddi təyin edən parametr r , $1 \leq r \leq K_L$ daxil edilir və əgər L-sorğusu daxil olarkən L və H sorğularının sayı arasındakı fərq r -dən azdırsa, daxil olan L-sorğusu L-buferinə əlavə olunur; əks halda L-sorğulardan biri (növbənin əvvəlində olan) α ehtimalla H-buferinə keçirilir, və ya $1 - \alpha$ ehtimalla L-buferində qalır; əks halda eyni ehtimalla sistemdən itirilir. Bu zaman $J(n_H, n_L)$ prioritetlər belə müəyyən edilir:

$$J(n_H, n_L) = \begin{cases} \alpha, & \text{əgər } n_L - n_H \geq r, \\ 0 & \text{digər hallarda.} \end{cases} \quad (1)$$

Aşağıda izahın dəqiqliyi üçün (1) düsturuna əsaslanan JP istifadə edilir. Əgər (1) düsturunda $\alpha = 1$ qəbul etsək, bu zaman determinik prioritetlər alınır, yəni L və H sorğuların sayı arasındakı fərq ən azı r qədər olduqda, növbənin əvvəlindəki L-sorğusu H-sorğuların növbəsinə keçirilir. [1-6]

Əgər sistemdə müxtəlif tipli sorğular üçün ümumi növbə varsa, bu zaman buferin ölçüsü K , $K < \infty$ qəbul olunur və L sorğusunun tipi dəyişdikdən sonra o, həmin buferdə qalır, lakin artıq H-sorğusu kimi qəbul edilir. Bu modeldə r üçün icazə verilən hədd parametrləri $1 \leq r \leq K$ aralığında ola bilər. Bu modeldə aşağıdakı kimi vəziyyətlər mümkündür: ümumi bufer yalnız bir tipli sorğularla tam doludur, lakin digər tipli sorğulara xidmət göstərən server boşdur, və yeni daxil olan uyğun tipli sorğu həmin serverə keçə bilmir. Belə arzuolunmaz halların qarşısını almaq üçün bu modeldə aşağıdakı giriş siyasəti qəbul edilir: əgər bufer yalnız H-sorğularla (və ya L-sorğularla) tam doludursa, lakin S-server (və ya F-server) boşdursa, bu halda daxil olan L-sorğusu (və ya H-sorğusu) bufer mərhələsini keçərək birbaşa S-serverə (və ya F-serverə) keçməsinə icazə verilir.

Ədəbiyyat

- [1]. Mehbaliyeva, E.V. Heterogen serverləri və müxtəlif tipli sorğuları olan sistemin riyazi modelinin qurulması // –Sumqayıt: Sumqayıt Dövlət Universiteti. Elmi xəbərlər jurnalı. Təbiət və texniki elmlər bölməsi.–2019. Cild 19. –№ 2. –s.84-88.
- [2]. Мехбалиева, Э.В. Алгоритм расчета характеристик системы с гетерогенными серверами и очередями // XII International Scientific-Practical Conf. Internet-Education-Science. 26-29 may 2020. –Vinnytsia, Ukraine. –p.123-126.
- [3]. Мехбалиева, Э.В. Алгоритм расчета системы с гетерогенными серверами и ограниченной очередью // Інформація Системləri və Texnologiyalar: Nailiyyətlər və Perspektivlər II Beynəlxalq Elmi Konfransı. –Sumqayıt. –9-10 iyul. –2020.–s. 218-220.
- [4]. Melikov, A.Z. Analysis and optimization of system with heterogeneous servers and jump priorities / A.Z.Melikov, E.V.Mekhbalıyeva // J. Comp. Syst. Sci. Int. –2019. Vol. 58. Iss. 5. – p. 718-735.

- [5]. Меликов, А.З. Телетрафик: Модели, методы, оптимизация / А.З.Меликов, Л.А.Пономаренко, В.В.Паладюк . –Киев: Политехника, –2007. –256 с.
- [6]. Гнеденко, Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В.Гнеденко, И.Н.Коваленко. –М.: Наука, –1987. –336 с.

Summary

Models of service systems with jumping priorities (jp) depending on the difference in the number of various types of requests in the queue, buffers, and heterogeneous servers

Mekhbaliyeva E.V.

Key words: *fast server, slow server, jumping priority, request, buffer*

Models with limited-size buffers (dedicated and shared) are considered. For both types of models, jumping priorities are defined based on the difference in the number of low- and high-priority requests: if this difference exceeds a predetermined threshold, one of the low-priority requests is transferred to the high-priority queue with a certain probability. In another model, jumping priorities depend not on the difference in the number of requests of different types, but on the specific number of requests of each type. In this case, models with unlimited buffers are studied. Exact and approximate methods are proposed to calculate the characteristics of the presented models, and the high accuracy of the developed approximate formulas for calculating stationary distributions and performance metrics is demonstrated.

Резюме

Модели систем обслуживания с скачкообразными приоритетами (jp), зависящими от различия в количестве заказов разных типов в очереди, буферах и гетерогенных серверах

Мехбалиева Э.В.

Ключевые слова: *быстрый сервер, медленный сервер, прыгающий приоритет, запрос, буфер*

Рассматриваются модели с ограниченными по размеру буферами (сепарабельными и общими). Для обоих типов моделей прыгающие приоритеты определяются на основе разницы в количестве заявок с низким и высоким приоритетом: если эта разница превышает заданный порог, с определённой вероятностью одна из заявок с низким приоритетом переводится в очередь высокого приоритета. В другой модели предполагается, что прыгающие приоритеты зависят не от разницы в количестве заявок разных типов, а от конкретного числа заявок каждого типа. В этом случае изучаются модели с неограниченными буферами. Для расчёта характеристик представленных моделей предлагаются точные и приближённые методы, демонстрируется высокая точность разработанных приближённых формул для вычисления стационарных распределений и характеристик.

УДК 004.896 : 681.515.4

DOI 10.54758/16801245_2026_26_1_69

Архитектура интеллектуальных систем управления процессами дегидрирования углеводородов на основе нейросетевых технологий и цифровых двойников

Гулиева Нюбар Алимурад гызы  0000-0002-2634-3269

Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан, д.ф.т., преподаватель
nubar.guliyeva@sdu.edu.az

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

История статьи
Получено: 20.10.2025
Исправлено: 16.01.2026
Принято: 06.02.2026

Ключевые слова
дегидрирование углеводородов,
искусственный интеллект,
нейронные сети, цифровые
двойники, каталитические
процессы, оптимизация,
промышленные системы управления

РЕЗЮМЕ

В данной статье анализируются современные подходы к управлению процессами дегидрирования углеводородов, основанные на технологиях искусственного интеллекта. Показаны перспективы перехода от классических методов математического моделирования к адаптивным системам управления на основе нейросетевых технологий и цифровых двойников. Предложены новые методы косвенного измерения каталитической активности и степени закоксованности. Результаты исследования демонстрируют возможности повышения эффективности промышленных реакторно-регенераторных блоков на 10-15%.

Введение

Нефтехимическая промышленность включает процессы каталитического дегидрирования, являющиеся фундаментальными в производстве олефинов и ароматических соединений. К классическим системам управления реакторно-регенераторными блоками (РРБ), которые в своей основе опираются на классическую методологию математического моделирования и на применение линейных регуляторов, в настоящее время предъявляются растущие требования к точности, адаптивности и энергоэффективности [3, 6].

Цифровое преобразование автоматизации в химической промышленности является современной тенденцией, которая предоставляет возможности для машинного обучения, искусственного интеллекта и концепцию цифровых двойников. Системы предиктивного управления и нейросетевые подходы к оптимизации каталитических процессов вызывают особый интерес.

Предлагается направление для интеграции современных методов искусственного интеллекта, таких как адаптивные нейро-нечеткие контроллеры и цифровые двойники, с традиционными методами процессного управления. Эта интеграция открывает новые возможности для повышения надежности и эффективности управления в сложных химических технологических процессах. Очевидно, данная представляет собой начальную стадию перед всеобъемлющей разработкой проекта автоматизации управления промышленными технологиями и предполагает ряда дополняющих решений в областях, как моделирования, так и адаптации и управления.

Анализ современного состояния проблемы. Классические системы управления РРБ основаны на математических моделях, описывающих кинетику химических реакций, тепло- и массообмен, гидродинамику потоков [6, с.205]. Однако такие системы имеют ряд принципиальных ограничений:

1. Сложность параметрической идентификации в условиях изменяющихся свойств сырья и старения катализатора;
2. Ограниченная адаптивность к нестационарным режимам работы;
3. Необходимость экспертного вмешательства при отклонениях от регламентных параметров;
4. Неточность косвенных измерений ключевых параметров (степень закоксованности катализатора).

Внедрение инноваций машинного обучения дает новые возможности в сфере управления многоуровневыми химическими процессами:

Глубокие нейронные сети демонстрируют способность к анализу сложных нелинейных зависимостей в многомерных данных процессов, достигая точности прогнозирования свыше 95% [7].

В качестве перспективного направления дальнейших исследований предлагается концептуальная архитектура интеллектуальной системы управления процессами дегидрирования углеводородов, состоящая из нескольких ключевых уровней.

Уровень сбора данных включает использование современных интернета вещей-сенсоров для мониторинга технологических параметров, интеллектуальных анализаторов состава потоков, систем машинного зрения для диагностики оборудования, а также виртуальных датчиков на основе разработанных математических моделей, которые обеспечивают непрерывное и комплексное получение информации.

На уровне предобработки и фильтрации предлагаются алгоритмы очистки данных от выбросов и пропусков, синхронизация и объединение разнородных данных, а также статистическая обработка и нормализация, что повышает качество входной информации для последующего анализа.

Уровень аналитики и моделирования предполагает создание цифрового двойника реакторно-регенераторного блока на основе гибридного моделирования, использование нейросетевых предикторов для оценки ключевых параметров процесса и внедрение систем обнаружения аномалий и предиктивной диагностики, что дает возможность прогнозировать и предупреждать отклонения технологических режимов [7].

На уровне принятия решений целесообразно применить методы мультикритериальной оптимизации управляющих воздействий, адаптивные контроллеры, основанные на алгоритмах машинного обучения, и системы поддержки принятия решений операторами. Данный уровень обеспечивает интеллектуальное и адаптивное управление процессом, позволяя оперативно реагировать на изменения и поддерживать оптимальные режимы.

Как отмечено, настоящее исследование в большей степени несет в себе характер именно предпроектного анализа и структурного синтеза, следовательно, главной целью данного этапа исследования является структурная интеграция элементов современных технологий искусственного интеллекта и поиск эффективных конструкций в процессном управлении, обогащённом применением средств искусственного интеллекта и машинного обучения.

Принимая во внимание современные проблемы систем управления РРБ и прогресс интеллектуальных технологий управления, необходимо рассмотреть основные элементы процессов, лежащих в основе работы этих систем. Для полного понимания возможностей использования машинного обучения в управлении реакторно-регенераторными блоками необходимо изучить физико-химические основы процессов, которые происходят в них.

Технология псевдооживленного слоя с использованием мелкозернистого катализатора традиционно относится к продвинутым, быстро самоокупающимся системам. Гетерогенный каталитический процесс в псевдооживленном слое, как правило, состоит из нескольких этапов. Реагенты продвигаются к поверхности катализатора, адсорбируются активными центрами, происходит химическое превращение, после чего продукты десорбируются и

перемещаются в газовую фазу. Использование мелкозернистого катализатора в псевдооживленном состоянии повышает удельную поверхность контакта и интенсифицирует процессы массообмена. от 0,01 до 6 мм широко используется в реакторно-регенераторных блоках процессов дегидрирования углеводородов. Работа реакторного блока каталитического процесса основана на подаче газообразного реагента с определенной скоростью снизу вверх через слой катализатора, что приводит к образованию псевдожидкого состояния твердых частиц катализатора. В этом состоянии частицы катализатора перемешиваются очень интенсивно и образуют систему, напоминающую кипящую жидкость [6, с.114].

Гетерогенный каталитический процесс в псевдооживленном слое включает последовательность стадий: диффузию реагентов к поверхности катализатора, адсорбцию на активных центрах, химическое превращение, десорбцию продуктов и их диффузию в газовую фазу. Использование мелкозернистого катализатора в псевдооживленном состоянии обеспечивает значительное увеличение удельной поверхности контакта и интенсификацию массообменных процессов [1].

Наиболее распространенным методом математического описания процессов в реакторах этого типа является модель псевдооживленного слоя двух фаз. В модели псевдооживленный слой состоит из двух взаимосвязанных фаз. Плотная фаза содержит частицы катализатора и интерстициальный газ, а дискретная фаза состоит из газовых пузырей, проходящих через плотную фазу. В двухфазной модели эффективность определяется точностью описания межфазного массообмена, измеряемого коэффициентом массопередачи между фазами. Конвективный перенос в обеих фазах, диффузионное перемешивание в плотной фазе и потенциальное изменение реакционного объема – все это включено в модель, которая особенно важна для реакций, в которых изменяется количество молекул. Модель имеет практическую ценность из-за возможностей прогнозирования конверсии реагентов, селективности процесса и оптимизации режимных параметров. Современные изменения двухфазной модели включают нестационарные режимы работы и учет стефановского потока при изменении объема реакционной смеси. Использование двухфазной модели и современных методов машинного обучения предоставляет своего рода новый подход к созданию интеллектуальных систем управления, способных адаптироваться к изменяющимся условиям процесса и обеспечивать оптимальные режимы работы реакторно-регенераторных блоков.

Процесс каталитического дегидрирования парафиновых углеводородов играет важную роль в получении мономеров для синтетических каучуков. Эндотермический процесс дегидрирования, проводимый в области высоких температур, приводит к быстрому коксованию катализатора. Непрерывная регенерация катализатора в псевдооживленном слое (ПС) является основным показателем эффективности процессов в системах реакторно-регенератор.

Моделирование процессов с твердыми пылевидными катализаторами в ПС проводится на допущении о квазигомогенности реакционной среды окислительно-восстановительных реакций выжигания кокса, а также других химических реакций, имеющих место при регенерации катализатора. Основные вопросы проектирования конструкции, а также определения режима работы системы регенерации, связаны с необходимостью достижения нужной линейной скорости вводимого в регенератор воздуха. Этим фактором определяется структура ПС, начиная с порозности слоя, скорости фильтрационного течения газа через слой, до средней скорости реакций удаления кокса с поверхности катализатора.

В области гидромеханики ПС особое внимание уделяется на факт наличия пузырьковой фазы, образующейся и уничтожающейся в разных точках пространства в

регенераторе. Учет образования пузырей и их исчезновения введением дополнительной фазы, называемой разбавленной, приводит к двухфазным моделям ПС [1, 2].

Нами принята упрощающее допущение, что структура ПС состоит из плотной и разбавленной фаз. Между этими двумя фазами имеет место тепло – и массообмен.

На рисунке показана структура взаимосвязи фаз по материальному и тепловому балансам.

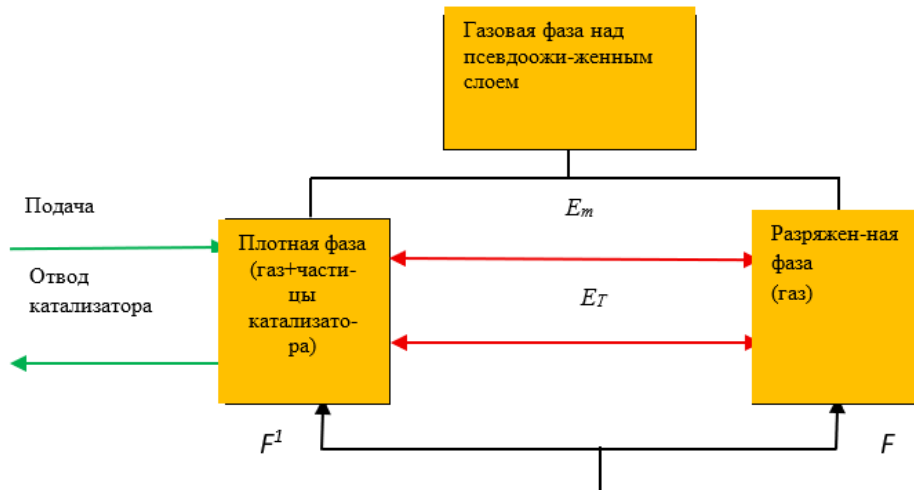


Рис.1. Двухфазная структура псевдооживленного слоя регенерации катализатора.

Для разбавленной фазы уравнения, начальные и граничные условия имеют вид:

$$V^0 \frac{dC_i^0}{dt} + F^0 \frac{dC_i^0}{dh} = E_m A_c (C_i - C_i^0) - v_3 k_5 C_{mon}^0, \quad (1)$$

$$V^0 \frac{dC_{mon}^0}{dt} + F^0 \frac{dC_{mon}^0}{dh} = E_m A_c (C_{mon} - C_{mon}^0) + k_5 C_{mon}^0, \quad (2)$$

$$c_6 V^0 \frac{dT^0}{dt} + F^0 \frac{dT^0}{dh} = E_T A_c (T - T^0) - k_5 q_{mon} C_{mon}^0, \quad (3)$$

$$k_i = k_{0i} \exp(E_i / RT), i = 1, 3$$

Уравнения и начальные условия для газа в плотной фазе имеют вид:

$$V' \frac{dC_i}{dt} = F'(\beta_i - C_i) + E_m A_c \int_0^H (C_i^0 - C_i) dh - V'(k_1 C_C^2 C_i - k_2 C_C^2 C_i); \quad (4)$$

$$V' = \delta(1 - \varepsilon)V_{ПС}$$

$$t = 0, \quad C_{CO_2}(0) = C_{CO_2}^*, \quad C_{O_2}(0) = C_{O_2}^*,$$

$$C_{CO}(0) = C_{CO}^*, \quad C_{ad}(0) = C_{ad}^*, \quad C_{mon}(0) = C_{mon}^*,$$

Уравнения и начальные условия для твердой фазы имеют вид:

$$\rho_\kappa V \frac{dC_C}{dt} = F_\kappa [z(T, C_C) - C_C] - 2C_C^2 C_{O_2} (k_1 + k_2) V, \quad (5)$$

$$\rho_k c_k V \frac{dT}{dt} = c_k F_k (t_0 - T) + c_b F_b (T_b - E) - \int_0^H (T - T_0) dh + V \sum_{i=1}^S w_i q_i - D_{cp} (T - T_{cp}), \quad (6)$$

Обозначения:

t – время;

h – пространственная координата;

H – высота псевдооживленного слоя;

δ – доля объема, занятого плотной фазой;

ε – доля объема, занятого твердой фазой;

C_i – концентрации в плотной фазе - кислорода (O_2), двуокиси углерода (CO_2), монооксида углерода (CO), адсорбированных углеводородов (ад), дополнительного топлива, подаваемого в регенератор (топ);

C_i^0, T^0 – концентрации вышеуказанных веществ и температура в разбавленной фазе;

C_c, T – концентрация кокса на катализаторе и температура плотной фазы, равная температуре частиц;

ρ_l, ρ_b – плотности катализатора и воздуха при температуре T ;

V_{PC} – объем псевдооживленного слоя;

$V^0 = (1 - \delta)V_{PC}$ – объем псевдооживленного слоя разбавленной фазы;

$V' = \delta(1 - \varepsilon)V_{PC}$ – объем псевдооживленного слоя плотной фазы;

$V = \delta\varepsilon V_{PC}$ – объемы псевдооживленного слоя твердой фаз;

F^0, F', F_k, F_c – массовые расходы газов в разбавленной и плотной фазах, циркулирующего катализатора, а также сырья, подаваемого в реактор;

k_i, k_{oi}, E_i – параметры температурной зависимости скоростей вышеуказанных реакций;

E_m, E_T – коэффициенты массо – и теплообмена между пузырями и плотной фазой, рассчитанные на единицу объема;

A_c – эффективная поверхность контакта между разбавленной и плотной фазами;

q_i – тепловые эффекты реакций;

c_b, c_c, c_k – теплоемкости воздуха, сырья каталитического крекинга, и катализатора;

D_{cp}, T_{cp} – коэффициент теплопотерь в окружающую среду и температура окружающей среды;

n – кратность циркуляции катализатора;

v_i – стехиометрические коэффициенты;

C_i^* – начальные концентрации веществ на входе в ПС;

Интеграция методов искусственного интеллекта и концепции цифровых двойников открывает новые возможности для управления сложными каталитическими процессами дегидрирования углеводородов. Использование нейросетевых моделей в сочетании с физико-химическими уравнениями реакторно-регенераторных систем позволяет значительно повысить точность прогнозирования, устойчивость и адаптивность технологических режимов. Тем самым формируется основа для перехода к интеллектуализированным производственным комплексам нового поколения, где взаимодействие данных, моделей и решений становится непрерывным и самообучающимся процессом.

Такое развитие отражает естественную эволюцию инженерной мысли: от строгих моделей и регламентов – к гибким системам, способным понимать и предвосхищать поведение живой технологической среды. В этом переходе соединяются кинетическое моделирование процессов, происходящих в сложной реакционно-регенерационной системе, аналитика применения технологии искусственного интеллекта, которые образуя новый синтез, где как традиционная математическая формализация задачи управления, так и современные принципы управления соединяются во едино, в котором традиционные

элементы автоматизации принимают разумное сочетание с алгоритмами адаптации и искусственного интеллекта.

Заключение

Разработанная ранее двухфазная модель кипящего слоя катализатора, является базовой для создания интеллектуальной системы управления процессами дегидрирования. Используя комбинация этой модели с глубоким математическим моделированием, цифровыми двойниками и адаптивными алгоритмами вполне возможно существенно повысить точность и надежность регулирования. Этот подход, предоставляет способ расширения детализации модели реакторно-регенераторного блока для виртуальной диагностики, а для анализа многомерных данных целесообразно применить комплекс специализированных нейросетей в целях оценки состояния катализатора и прогнозирования параметров. Перспективным направлением является внедрение нейро-нечетких контроллеров, которые обеспечат самообучающуюся адаптивность к изменению режимов и сырья. Это предложение создает прочный фундамент для развития систем управления в нефтехимии, направленных на повышение энергоэффективности и экологической безопасности.

Литература

- [1]. Антонюк, С.Н. Термокаталитические процессы переработки тяжелых нефтей: учебное пособие / С.Н.Антонюк, – М.: МИРЭА – Российский технологический университет, – 2023, –35 с.
- [2]. Губайдуллин, И.М. Математическое моделирование каталитических процессов и реакторов / И.М.Губайдуллин, В.И.Быков, М.Г.Слинко. –М.: Химия, –2021. –368 с.
- [3]. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии / В.В.Кафаров, И.Н.Дорохов. –М.: Наука, –2019. –502 с.
- [4]. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева. Учебное пособие. <https://studfile.net/preview/8848175/page:22/>
- [5]. Нагиев, А.Г. Моделирование нестационарных тепловых режимов реакторного блока установки каталитического крекинга для пуска и управления в критических ситуациях / А.Г.Нагиев, Н.А.Амрахова // Азербайджанский химический журнал, №4, –Баку, –2001, – с.40-45.
- [6]. Островский, Г.М. Методы оптимизации химических реакторов / Г.М.Островский, Ю.М.Волин. –М.: Химия, –2020. –296 с.
- [7]. Подольный, В.А. Применение машинного обучения и нейросетей в химической промышленности // Вестник науки. –2025. №3 (84).

Xülasə

Neyroset texnologiyaları və rəqəmsal əkizlərə əsaslanan karbohidrogen dehidrogenləşmə proseslərinin ağıllı idarəetmə sistemlərinin arxitekturası

Quliyeva N.Ə.

Açar sözlər: karbohidrogen dehidrogenləşməsi, süni intellekt, neyron şəbəkələri, rəqəmsal əkizlər, katalitik proseslər, optimallaşdırma, sənaye idarəetmə sistemləri.

Məqalədə karbohidrogenlərin dehidrogenləşməsi proseslərinin idarə edilməsi üçün süni intellekt texnologiyalarına əsaslanan müasir yanaşmalar tədqiq edilir. Klassik riyazi modelləşdirmə metodlarından neyron şəbəkə texnologiyalarına və rəqəmsal əkizlər konsepsiyasına əsaslanan adaptiv idarəetmə sistemlərinə keçidin perspektivləri göstərilir. Katalizator aktivliyinin və koklaşma dərəcəsinin dolayı ölçülməsi üçün yeni metodlar təklif edilir. Tədqiqat nəticələri sənaye reaktor-regenerator bloklarının effektivliyinin artırılması imkanlarını nümayiş etdirir.

Summary

Architecture of intelligent systems for managing hydrocarbon dehydrogenation processes based on neural network technologies and digital twins

Guliyeva N.A.

Keywords: *hydrocarbon dehydrogenation, artificial intelligence, neural networks, digital twins, catalytic processes, optimization, industrial control systems.*

This article investigates modern approaches to hydrocarbon dehydrogenation process control based on artificial intelligence technologies. The prospects of transition from classical mathematical modeling methods to adaptive control systems based on neural network technologies and digital twins are shown. New methods for indirect measurement of catalytic activity and coking degree are proposed. Research results demonstrate possibilities for 10-15% efficiency improvement of industrial reactor-regenerator units.

Architecture of intelligent control systems for hydrocarbon dehydrogenation processes based on neural network technologies and digital twins

Qarışdırıcı intiqalların elektromexaniki parametrləri əsasında polimerləşmə prosesi gedişinə operativ nəzarət məsələsi

Həşimova Hüsniyyə Mirbağı qızı ^{ORCID 0000-0001-9712-3522}

Sumqayıt Dövlət Universiteti, Sumqayıt, Azərbaycan, tex.f.d., müəllim
husniyya.hashimova@sdu.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p><i>Məqalənin tarixçəsi</i> Daxilolma tarixi: 21.10.2025 Düzəliş tarixi: 06.02.2026 Qəbulolunma tarixi: 03.03.2026</p>	<p><i>Təqdim olunan tədqiqat işi periodik polimerləşmə proseslərinin temperatur, konsentrasiya, inisiator və inhibitor təminatı rejimlərinin verilmiş program üzrə inkişafının avtomatlaşdırılmış idarəetmə sistemi səviyyəsində realizasiyasına həsr olunmuşdur. Reoloji tədqiqat əsasında qurulan nəzarət sisteminin aparat vasitəsi olaraq ənənəvi ölçü sistemlərindən fərqli, yəni reaktor daxili qarışdırıcı aqreqatın elektromexaniki parametrlərindən istifadə əsasında identifikasiya məsələsi qarşıya qoyulur. Göstərilir ki, reaksiya materialı – süspenziyanın qeyri-nyüton xassəli maye sinfində tədqiqi ölçmə prosesinə operativlik, identifikasiya obyektinə isə informativlik gətirmə baxımından orijinal yanaşmanı əks etdirir. Bu yanaşmanın elmi və praktiki cəhətdən əsaslı olduğu müvafiq şəraiti kifayət qədər dolğun əks etdirən pilot qurğusunda aparılan sınaqlarda öz təsdiqini tapa bilmişdir. Təklif olunan identifikasiya alqoritmi qurğunun ən zəruri elektromexaniki parametrlərini daxil edir ki, bu da sistemin həssaslıq göstəricilərinin qiymətləndirilməsinə imkan verir</i></p>
<p><i>Açar sözlər</i> polimerləşmə prosesi, operativ nəzarət, reoloji tədqiqat, sabit cərəyan intiqalı, elektromexaniki xarakteristika</p>	

Giriş

Məlumdur ki, yüksək molekullu birləşmələrdə və o cümlədən polimer əsaslı materiallarda əksər mexaniki parametrlər onların molekulyar kütlə paylanma funksiyaları (MKPF) ilə sıx əlaqəlidir [1, 2]. Polimer materiallar tədqiqində bu paylanmaları statistik momentlər əsasında parametrikləşdirmədən geniş istifadə olunur [3]. Konkret materiallar üçün bu statistik momentlərin qiymətləndirilməsi MKPF-lərin əldə edilməsindən heç də asan deyildir. Çünki parametrikləşdirmə yalnız tədqiqat məsələlərində informasiya emalının sadələşdirilməsinə xidmət edə bilər, baxılan funksiyanın əldə olunma texnologiyasına heç bir metod gətirə bilmir[4].

Hazırda polimerlərin və ya digər yüksək molekullu materialların istehsalı zamanı bu funksiyanın real vaxt miqyasında təkamülünü səmərəli şəkildə izləmək faktiki olaraq mümkün deyildir. Elmi ədəbiyyatda faktik MKPF-lər ilə texnoloji rejim parametrləri arasında korelyasiya asılılığından istifadə cəhdi aşkar şəkildə özünü göstərir. Bu sahədə geniş tətbiq tapmış bir sıra ekspres metodlar yaranmışdır ki, onların əksəriyyəti özlülük faktoruna istinad edir (Mark-Kuhn-Houwink tənliyi) [5].

Elmi-texniki ədəbiyyatda polimerlərin viskozimetrik analizinə həsr olunmuş çoxsaylı tədqiqatlara rast gəlmək mümkündür [6, 7]. Lakin bu qəbildən olan eksperimental ölçmələrin real prosesdən kənarında, yəni real vaxt rejimində, aparat daxilində deyil, yalnız laboratoriya şəraitində həyata keçirilməsinin qeyri-operativlik və kalibrlənmə problemləri yaratdığı da məlumdur ki, məhz bu səbəbdən bu mühüm göstəricinin praktiki baxımdan informativliyi heç də yüksək qiymətləndirilə bilmir.

Tədqiqatımızda qarşıya qoyduğumuz əsas məqsəd məhz ölçü sistemi aparat vasitələrinin istehsal mühitinə köçürülməsinə nail olaraq, avtomatlaşdırılmış qaydada reoloji ölçmələrin həyata

keçirilməsini təmin edən metodikanın işlənməsi və bu metodikanı realizə edən sistemin sintezi olmuşdur.

Qeyd edək ki, müasir şəraitdə istehsal proseslərinin dinamikasının real vaxt rejimində monitorinqi bir zərurət təşkil edir ki, məhz bu səbəbdən də qarşıya qoyduğumuz problem bilavasitə idarə olunan keyfiyyət probleminin həllinə yönəldilmişdir.

Məsələnin qoyuluşu. Polimer istehsalı texnologiyasında məlumdur ki, latekslərin qarışdırılması üçün tələb olunan güc başlanğıc həddə orta zəncir ölçüləri ilə mütənasib sürətdə artdığı halda, sonrakı artım zamanı aşkar qeyri-xətti xarakter daşımağa başlayır. Qeyri nyuton xassə daşıyan əksər yüksək molekullu materialların qarışdırılması prosesində özlü müqavimət momenti sürət qradiyentindən özünəməxsus xarakteristikalar əsasında dəyişir.

Tədqiqatımızın əsas ideya xəttini kompozit materialların istehsal mərhələsində xammalın axıcılıq əyrilərinə məxsus bu özəl cəhətin yekun keyfiyyətin proqnozunda bilavasitə istifadə etmək təşkil edir. Bu ideyanın ən əsas özəlliyi kimi isə hesab edirik ki, monitorinq prosesi üçün reaktor daxili qarışdırıcı intiqalın operativ işçi xarakteristikası ən zəngin operativ informasiya mənbəyi olaraq, bilavasitə istifadə edilə bilər.

Ölçü texnikası baxımından qeyri nyuton xassəli mühitin reoloji göstəricilərinin təyin edilməsində ən yaxın analogiya olaraq, şübhəsiz, Brukfeld viskozimetrinin iş prinsipini göstərə bilərik. Ölçü mühitinə daxil edilmiş müxtəlif quruluşa malik rotasiya oxunun sabit fırlanma sürəti ilə fırlanması və bu zaman meydana çıxan müqavimət qüvvəsinin ölçülməsinə əsaslanan bu prinsipin real istehsal proseslərində prototip kimi götürülməsi, demək olar ki, təməmilə özünü doğrulda bilər. Brukfeld viskozimetri məsələn, DV2T seriyası ilə istehsal olunan nümunə [8], praktiki olaraq sənaye miqyaslı texnoloji prosesin gedişində istifadəyə qətiyyənlə yararlı sayıla bilmir. Bu məhdudluğu aşkar şəkildə göstərən ən əsas arqumentlər kimi ilk növbədə aşağıdakılar göstərilə bilər:

1. Əsas rotasiya elementi olan fırlanan pərlərin miqyasının ölçmə prosesində həlledici rol oynaması. Məsələn, farmasevtika təyinatlı bir sıra məlhəmlərin xarakteristikalarının qiymətləndirilməsi [6] üçün istifadə olunan cihazın həm rezervuarı, həm də rotasiya pərləri fərqli ölçüləri təşkil edir. Digər tərəfdən apardığımız əvvəlki tədqiqatlardan əldə etdiyimiz nəticələr [9] göstərmişlər ki, reoloji tədqiq cihazında rotasiyaya qarşı müqavimət momentinin qiymətini müəyyən edən faktorlar içərisində aparatın qabarit ölçüləri böyük əhəmiyyət daşıyır. Bu faktor tədqiqat aparatında özünü nümayiş etdirən maye dinamikası proseslərinin özəl cəhətləri ilə bağlı olub, miqyas keçidi problemi kimi müvafiq sahədə nəzəri müddəaları özündə əks etdirir.

2. Məlum ölçmə metodları və onların həyata keçirildiyi aparat vasitələrində rotasiya sürəti sabitdir və bu cəhət yalnız verilmiş sürətlər diapazonunda özlülüyün qiymətləndirilməsinə xidmət edə bilər. Qarşıya qoyduğumuz geniş diapazonda axıcılıq əyrisinin qurulması ilə keyfiyyətə nəzarət probleminin qarşıya qoyduğu məsələnin həllinə isə, heç cür cavab verə bilmir.

3. Operativ ölçmə prosesinin həyata keçirilməsi cihazın periodik olaraq polimerləşdirmə reaktorunun daxilinə yerləşdirmək və avtomatik texniki təminat problemi heç də özünü doğrultmayacaq dərəcədə mürəkkəb avtomatlaşdırmanı tələb edir.

Əlbəttə, özlülük ölçən cihazların əksəriyyətində fırlanma bucaq sürətinin pilləli dəyişdirilməsi nəzərdə tutulmuş olsa da, fasiləsiz dəyişən axın sürətli mühitin yaradılması qarşıya qoyulan problemin həllində prinsipial mahiyyət kəsb etməsi də, qeyd etmək lazımdır ki, bir mühüm arqument kimi nəzərdən atıla da bilməz.

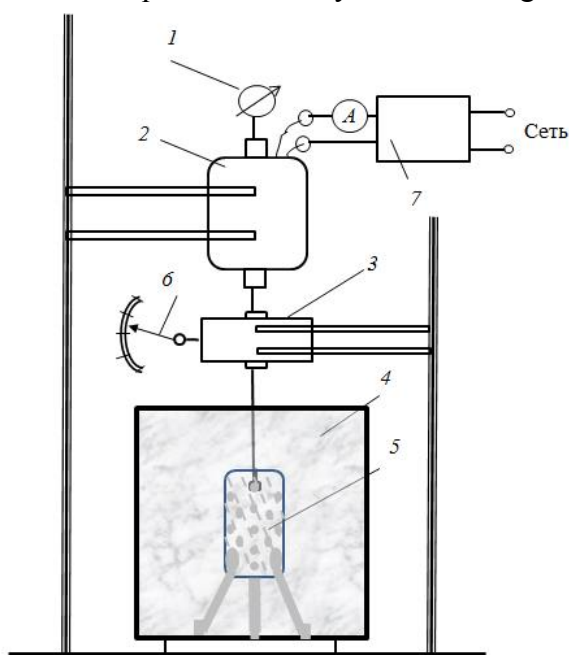
Bu qeyd olunanların nəzərə alınması ilə tədqiqatımızda operativ monitorinq modeli olaraq sənaye reaktorunu imitasiya edən pilot qurğu yaradılmış [9] və tədqiqat həmin qurğu üzərində həyata keçirilmişdir. Qurğunun prinsipial sxemində (şəkil 1) bucaq sürətinin ölçülməsi üçün taxometr, fırlandırıcı elektrik intiqalında mühərrikin lövbər cərəyan şiddətinin ölçülməsi üçün ampermetr (1), güc dövrəsinin qidalandırma xəttində sabit gərginlik stabilizatoru (7), elektrik mühərriki (2), pilləsiz friksion ötürmə vasitəsi olaraq pilləsiz variator (3), friksion pərlərin fırlanma

sürətinin göstərən taxometr (6), lateks ilə doldurulmuş rezervuar (4) və qarışdırıcı rolunu oynayan relyefli ucluq öz əksini tapmışdır.

Güc dövrəsində gərginlik stabilizatorunun yerləşdirilməsində məqsəd sabit cərəyan intiqalında mexaniki gücə mütənasib olan elektrik gücünün qiymətləndirilməsi üçün zəruri olan “volt-ampere” komponentlərinin dəqiq qiymətləndirilməsi olmuşdur. Variator reduksiya diapazonu (1-5) intervalında olan və dəstəklə idarə olunan mexanizmdən ibarətdir və laboratoriya şəraitində proqramlı sürətdə əl ilə dəyişdirilir. Bu halda intiqalda vala düşən müqavimət momenti yalnız lövbər cərəyanı qiymətində öz əksini tapır. Sürətin dəyişdirilməsi isə bütün digər elektriki parametrlərin sabit qalması ilə, yalnız variatorun ötürmə ədədinin dəyişdirilməsi hesabına həyata keçirilir.

Relyefli silindir şəklində olan qarışdırıcı tədqiq olunan material daxilində təbəqələr arası sürüşmə və müvafiq müqavimət momenti yaradır.

Qeyd edək ki, təklif etdiyimiz ölçü sisteminin dəqiqliyini müəyyən edən ən əsas məsələ elektrik intiqalının sərf etdiyi ani elektrik gücünün ölçülüb, qiymətləndirilməsi ilə bağlıdır.



Şəkil 1. Pilləsiz reduktiv variator tətbiqi əsasında reoloji tədqiq həyata keçirən laborator qurğusu [9].

Axıcılıq əyrisi funksiyası parametrlərinin intiqalın güc göstəriciləri ilə identifikasiyası

Elektrik intiqalının sərf olunan güc baxımından hesablanması mühəndis prktikasası üçün adi məsələ olduğuna baxmayaraq, bu ölçmənin məhz ölçü sistemi baxımından yerinə yetirildiyinin əlavə şərtləndirici xüsusiyyətləri də vardır. İlk növbədə sürətdən-sürətə keçid dinamikasında ani gücün dəyişməsinin, qərarlaşma prosesinin yaradılmasına sərf olunacaq müddətin nəzərə alınmasına ehtiyac yarandığı özünü göstərir. Bu baxımdan, təbii, ölçmə prosesinin kompüterləşdirilməsindən yarana biləcək səmərə özünü aşkar sürətdə göstərir.

Digər problematik məsələ mühərrikin sərf etdiyi ani elektrik gücün dəqiq təyin edilməsi, yəni nəzərə alınması çətin olan güc itgilərinin qiymətləndirilməsidir. Sərf olunan (faydalı) mexaniki gücün real elektrik ekvivalentinin (f.i.ə. baxımından) qiymətləndirilmə məsələsi dəqiqliyə təsir göstərən əsas amil olaraq meydana çıxır. Praktiki nəticələr göstərir ki, mühərrikin optimal güc parametrlərinin seçilməsi maksimal rotasiya

gücünün 1.5-2.0 misli diapazonunda götürülməsi məqsədə uyğundur. Bu müddəanın əsaslandırılması elektrik intiqazının aşağıdakı elementar hesabı ilə öz təsdiqini tapa bilər.

Konstruksiyada sabit cərəyan intiqalının sərf etdiyi ani gücün qiyməti ilə (lövbər dövrəsində işçi cərəyan şiddəti ilə) fırlanma hərəkətinə müqavimət momenti arasında determinik əlaqənin olmasından istifadə edilir. Məlum olduğu kimi, mühərrikin rotorunda mühitin özlü müqavimətinə qarşı yönəlmiş elektrik gücünü aşağıdakı kimi ifadə etmək olar [10]:

$$P_1 = M \cdot \omega = P_2 \eta^* ; \quad P_2 = I_2 U_n ; \quad (1)$$

harada ki, M – fırlandırıcı moment (stasionar rejimdə yükün müqavimət momentinə bərabər götürülür), ω – bucaq sürəti, P_1 – faydalı güc (müqavimət momentinə qarşı yönəlmiş), P_2, I_2 – mühərrikin qida mənbəyindən götürdüyü elektriki güc və müvafiq cərəyan şiddəti, η^* – ümumi güc

itgilərinin (elektrik və mexaniki təbiətli) nəzərə alınması ilə faydalı iş əmsalı, U_n – nominal gərginlikdir. Buradan (1) münasibətlərinin nəzərə alınması ilə aşağıdakı düsturu yazıla bilər:

$$M = I_2 \cdot U_n^* \frac{\eta}{\omega} \quad (2)$$

Göründüyü kimi, mühərrikin valına düşən müqavimət momentinin qiymətləndirilməsi üçün üç fiziki olaraq ölçülən kəmiyyətin və bir nominal xarakteristika məlumatı kimi bəlli olan (mühərrikin faydalı iş əmsalı) kifayət edir. Məlum olduğu kimi [10] rotasiyada müqavimət momentinin maye axınında sürüşmə gərginliyinə, axın sürətinin isə rotasiya sürətinə ekvivalent qəbul edilməsi, sabit əmsal fərqli dəqiqliklə özünü doğrulda, yəni $M = F(\omega)$ ifadəsinə haqq qazandıra bilər.

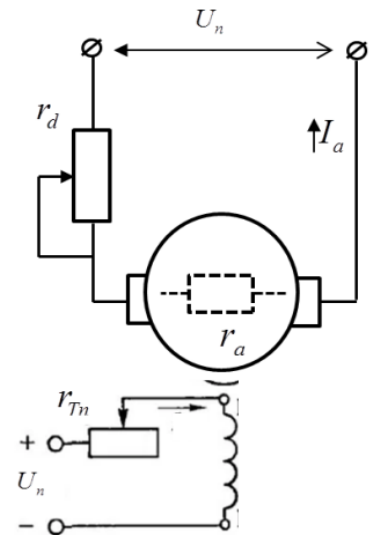
Qəbul edək ki, həm ω və həm də M kifayət qədər yüksək dəqiqliklə ölçülən bilən kəmiyyətdir. Belə olduqda identifikasiya dəqiqliyi məsələsinin ölçü aspektini ümumi qaydaya istinad edərək xüsusi törəmə konsepsiyası əsasında tərtib etmək heç bir çətinliklə qarşılaşmır. Ölçü texnikasında həssaslığın qiymətləndirilməsi alqoritmi kimi məlum olan xüsusi törəmə yanaşması baxdığımız məsələdə axıcılıq əyrisinin eksperimental identifikasiya keyfiyyətinin qiymətləndirilməsinə də xidmət edə bilər. Bunun üçün baxılan mexaniki sistemin güc balansı tənliyi əsasında ω -nın bir vahid artımına elektrik gücünün müvafiq artımı müəyyən edilməli və sonra bu asılılıqdan momentə keçmək lazım gəlir. Güc balansı tənliyindən istifadə məhz yüksüz işləmə gücünün təcrübənin nəticəsinə gətirdiyi xətanın aradan qaldırılmasına xidmət etdiyini görmək də çətin deyildir. Bu qiyməti yalnız mühərrikin və digər mexaniki hissələrin nominal texniki parametrləri əsasında qiymətləndirilməsi, təbii, yüksək dəqiqliyi təmin edə bilməsə də, tələb olunan dəqiqlik sinfinə uyğunlaşdırmanı təmin edə biləcəkdir.

Bununla yanaşı olaraq nəzərə alınmalıdır ki, şəkil 1-də göstərilən laborator qurğusu və onun üzərində həyata keçirilən təcrübələr əslində bir model nümunəsi olaraq daha mühüm idarəetmə məsələsinin, yəni operativ keyfiyyət analizi probleminin həllinə yönəlmiş olduğu üçün bir sıra prinsipial suallar diqqət mərkəzində saxlanılmalıdır. Təbii, bunlar içərisində iki aspekt özünü daha qabarıq göstərir:

- Qarışdırıcı aqreqatın (friktsion pərlərin) optimal konstruktiv quruluşuna və optimal ölçülərini təyini məsələsinə müstəqil surətdə baxılması;
- Götürülmüş intiqalın elektromexaniki parametrləri arasında dəqiq funksional asılılığın modelləşdirilməsi.

Problemin birinci aspekti, qeyd edə bilərik ki, müstəqil istiqamət olaraq bəzi baxış bucağı altında əvvəlki tədqiqatımızda müəyyən qədər öz əksini tapa bilmişdir [11]. Polimerləşmə reaktoru daxilində qarışdırıcı intiqalının iş rejiminə operativ nəzarət və keyfiyyət təhlilinə gəldikdə isə burada tədqiqat yüksək dərəcədə konkretlik tələb edir.

Şəkil 2-də elektrik intiqalında istifadə olunan sabit cərəyan mühərrikinin qoşulma sxeminin yalnız bir variantı verilmişdir. Şəkildə müvafiq parametrlər, yəni P_n – mühərrikin nominal gücünü, I_n – nominal lövbər cərəyanını, U_n – nominal gərginliyi, ω_n – nominal işçi parametrlərə müvafiq dövr sürətini, r_a, r_d, r_{Tn} – lövbər dolağı müqavimətinin, onun dövrəsinə qoşulmuş əlavə müqavimətin və təsirlənmə dövrəsi müqavimətinin nominal qiymətlərini əks etdirirlər.



Şəkil 2. Mühərrik dövrəsində real və ekvivalent müqavimətlər [9].

Sabit cərəyan mühərrikində ani gücün mühüm hissəsinin lövbər cərəyanı ilə müəyyən olduğunu və təsirlənmə cərəyanının isə təcrübə zamanı praktiki olaraq sabit qaldığını qəbul etmək olar. Güc itgilərini (r_a, r_d -də yaranan) ümumən istilik itgiləri kimi ümumiləşdirək. Sürtünmə ilə bağlı itgilər mexaniki itgi kimi adlandırılırsa, ümumən bunların cəmini intiqalın faydalı iş əmsalı kimi ifadə edək.

Digər tərəfdən lövbər cərəyanı

$$\frac{I \cdot U_n - P_1 - P_n(1 - \eta^{mex})}{I^2(r_a + r_d)} = 1 \quad (4)$$

tənliyinə nəzərən təyin edilə bilər. Alınan ifadə I -yə görə həll edilmiş olarsa:

$$I = \frac{-U_n \pm \sqrt{U_n^2 + 4(r_a + r_d)(M\omega + P_n(1 - \eta))}}{-2(r_a + r_d)} \propto M \quad (5)$$

lövbər cərəyanının bucaq sürətindən və dövrə parametrlərindən asılılığı üçün düstur əldə etmiş olarıq. Beləliklə, cərəyan şiddətinin ekvivalenti olan fırlandırıcı moment üçün lazım olan əsas düstur əldə edilmiş olur.

Qeyd etdiyimiz kimi həmin düstur şəkil 2-də göstərilmiş birləşmə variantı üçün öz doğruluğunu saxlaya bilər. Sənaye miqyaslı qurğu və aparatlarda qarışdırıcı intiqal əsasən dəyişən cərəyan mühərriklərinin istifadəsini nəzərdə tutur. Bu intiqallar sürətin geniş diapazonda hamar dəyişdirilməsi üçün münasib variant olmadığı üçün sabit cərəyan maşınına keçidin məsələsi aktuallaşır. Sabit cərəyan maşınlarının yük xarakteristikalarının təsirlənmə dövrəsinin qoşulma variantlarının müxtəlifliyi içərisində optimal sxemin seçilməsi, məlumdur ki [13], mühüm mühəndis məsələsini təşkil edir. Paralel, ardıcıl və kompaund birləşmə xemlərinin yük xarakteristikalarının müxtəlif olduğu kimi, parametrlərin funksional asılılıqları da ciddi surətdə fərqləndiyi məlumdur.

Aşağı sürətlərdə və böyük fırlandırıcı moment tələb olunan hallarda ardıcıl təsirlənmə sxeminə keçid zərurəti yaranır. Ardıcıl və ya qarışıq təsirlənmə sxemlərində I_a ilə ω arasında mütənasib asılılıq pozularaq, kvadratik qanunla əvəz olduğu ilə yanaşı, həm də maqnit sisteminin doyma rejimi özünü göstərir, elektromaqnit sistemi kəskin qeyri xətti xarakteri kəsb edir.

Əlbəttə, ölçü texnikası baxımından ən əlverişli variantın müstəqil təsirlənmə və ya sabit maqnitli təsirlənmə olduğunu qəbul edərək, şəkildə göstərilən variantın qəbul edilməsinə üstünlük verilə bilər. Lakin polimerləşmə proseslərində reaksiya qarışığının getdikcə yüksələn özlülüyü böyük müqavimət yaratdığı paralel birləşmənin mümkünlüyünü aradan qaldırır.

Beləliklə, qeyd olunan müddəaları ümumiləşdirərək aşağıdakı nəticələrə gəlmək mümkündür:

a) Periodik polimerləşdirmə proseslərində optimal keyfiyyət əldə etmə məsələsinin operativ texnoloji nəzarətin müstəsna əhəmiyyəti reoloji xarakteristikanın real vaxt rejimində əldə edilməsini, bu isə öz növbəsində reaksiya qarışığı üçün axıcılıq funksiyasının əldə olunmasını tələb edir.

b) Qarışdırıcı mexanizmin müştərək funksiya daşması, yəni əlavə olaraq ondan həm də real vaxt rejimində reoloji informasiya mənbəyi kimi istifadə oluna bilməsi, təməmlə real texnoloji amillərə istinad edə bilər. Məhz bu müştərək funksionallıq amilinin tətbiqi qarışdırıcı intiqalı böyük miqyasda Brukfeld viskozimetr analogiyasına çevirərək, operativ monitoring probleminin həllini reallaşdırır.

c) Qarışdırıcı intiqalın geniş sürət və fırlandırıcı momentlər diapazonlarında fəaliyyəti mühərrik seçimi məsələsinə öz şərtlərini irəli sürür. Bu baxımdan müstəqil təsirlənmə maqnit sisteminə malik sabit cərəyan mühərrikinin tətbiqi tövsiyə olunur ki, onun nominal gücü rotasiya pərlərinin qarşılaşdığı maksimal gücün 1.5-2.0 misli tərtibində olmasını tələb edir.

d) Qeyd olunan müddəalar laboratoriya və ya yarı pilot qurğusunda aparılmış ЭД-20 epoksid qətranı üzərində aparılmış təcrübələr əsasında irəli sürülmüşdür.

Yekun olaraq qeyd edək ki, qarışdırıcı intiqalın əsas funksiyası ilə yanaşı, onun həm də reoloji informasiya mənbəyi kimi iki funksionallığı, təbiidir ki, istehsalat şəraitində işçi rejimə özəl texnoloji yanaşmanı bilavasitə nəzərdə tutur. Prosesin periodik olması imkan verir ki, daimi rejim olaraq hər şeydən öncə latekslərin qarışdırılması həyata keçirilməli, monitoring rejimi olaraq isə reoloji xarakteristikanın əldə olunması periodik impuls rejimində yerinə yetirilsin.

Ədəbiyyat

- [1]. Крыжановский, В.К. Прикладная физика полимерных материалов / В.К.Крыжановский, В.В.Бурлов. –СПб.: СПбГТИ (ТУ), –2001. –261 с.
- [2]. Суриков, П.В. Влияние молекулярной массы и молекулярно-массового распределения на реологические свойства эпоксидных олигомеров // П.В. Суриков, А.Н. Трофимов, Е.И. Кохан [и др.] // Вестник МИТХТ им. М.В. Ломоносова. Т. 4, № 5. –2009. –с. 87-90.
- [3]. Берлин, А.А. Кинетика полимеризационных процессов / Б.А.А.ерлин, С.А.Вольфсон, Н.С.Ениколопан. –М.: Химия, –1978. –320 с.
- [4]. Киреев, В.В. Высокомолекулярные соединения / В.В.Киреев, –М.: Высшая школа, –1992. –512 с.
- [5]. Бриедис, И.П. Реология и молекулярное строение расплавов полиэтилена / И.П.Бриедис, Л.А.Файтельсон // Механика полимеров, № I, –1976, –с. 120-127.
- [6]. Кутузова, И.В. Реологические свойства мазей с полиненасыщенными жирными кислотами микробиологического происхождения / И.В.Кутузова, Ю.В.Степанов, Н.К.Бабанова [и др.] //Фармация, Т.40. –1991, –с.30-35.
- [7]. Li, Chun-Liang, Kinetics of Coil-to-Globule Transition of Dansyl-Labeled Poly(N -sopropylacrylamide) Chains in Aqueous Solution / Chun-Liang Li, Xiaodong Ye, Yan-Wei Ding // Chinese Journal of Chemical Physics 25(27), –2012. DOI:10.1088/1674-0068/25/04/389-397
- [8]. Вискозиметр Брукфильда – аналоговая модель Analog / <https://www.optimum-lab.ru/product/viskozimetr-brukfilda-analogovaja-model/> .
- [9]. Həşimova, H.M. Polimerləşmə prosesində viskozimetrik ölçmə texnologiyalarının təkmilləşdirilməsi ilə keyfiyyətə nəzarət probleminin tədqiqi: / Tex.f.d. elmi dərəcəsini almaq üçün diss. –Sumqayıt, SDU, –2023, –158 s.
- [10]. Забудский, Е.И. Электрические машины. ч.: Машины постоянного тока / Е.И.Забудский, –М.: ФГБОУ ВПО МГАУ, –2013. –217 с.
- [11]. Нагиев, А.Г. Идентификация функций молекулярно-массового распределения полимерных материалов по их механическим параметрам вязкого сопротивления / А.Г.Нагиев, В.В.Садыхов, У.М.Гашимова // Пластические массы т.98. №7. –М., –2016, –с.52-55.

Summary

The task of operational control of the polymerization process based on the electromechanical parameters of mixing devices

Hashimova H.M.

Keywords: *polymerization process, operational monitoring, rheological study, DC electric drive, electromechanical characteristic.*

The presented research work is devoted to the realization at the level of an automated control system of the development of temperature, concentration, initiator and inhibitor maintenance modes of periodic polymerization processes on a given program. As a hardware tool of the control system built on the basis of rheological research, the problem of identification is posed on the basis of using electromechanical parameters of the reactor internal mixing Unit, different from traditional measurement systems. It is shown that the study of the reaction material – suspension in the non-Newtonian liquid class reflects the original approach in terms of efficiency to the measurement process and informativeness to the identification object. He was able to find confirmation in the tests carried out on a pilot installation, which quite fully reflects the relevant conditions in which this approach is scientifically and practically

justified. The proposed identification algorithm includes the most necessary electromechanical parameters of the unit, which allows evaluating the sensitivity indicators of the system.

Резюме

Проблема оперативного управления процессом полимеризации на основе электромеханических параметров перемешивающих устройств

Гашимова У.М.

Ключевые слова: *процесс полимеризации, оперативный контроль, реологическое исследование, электропривод постоянного тока, электромеханическая характеристика.*

Представленная исследовательская работа посвящена реализации на уровне автоматизированной системы управления разработки по заданной программе температурного, концентрационного, иницирующего и тормозного режимов обеспечения процессов периодической полимеризации. В отличие от традиционных измерительных систем в качестве аппаратного средства системы управления, построенной на основе реологических исследований, то есть на основе использования электромеханических параметров внутреннего смесительного агрегата реактора, ставится вопрос об идентификации. Показано, что исследование реакционного материала – суспензии в классе жидкостей с неньютоновскими свойствами отражает оригинальный подход к процессу измерения с точки зрения оперативности, а объекта идентификации-информативности. Он смог найти свое подтверждение в испытаниях, проведенных на пилотной установке, которые достаточно полно отражают соответствующие условия, в которых этот подход научно и практически обоснован. Предлагаемый алгоритм идентификации включает в себя наиболее необходимые электромеханические параметры устройства, что позволяет оценить показатели чувствительности системы.

UOT 621.

DOI 10.54758/16801245_2026_26_1_83

Avtomatlaşdırılmış layihələndirmə sistemlərində layihə həll qəbulunun dəstəklənməsi sisteminin işlənməsinin metodoloji amilləri

Hüseynzadə Aysel Elxan qızı [ORCID 0009-0000-5435-8890](https://orcid.org/0009-0000-5435-8890)

Sumqayıt Dövlət Universiteti, Sumqayıt, Azərbaycan, müəllim
aysel.guseynzade@sdu.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p><i>Məqalənin tarixçəsi</i> Daxilolma tarixi: 29.09.2025 Düzəliş tarixi: 22.12.2025 Qəbul olunma tarixi: 06.02.2026</p> <hr/> <p><i>Açar sözlər</i> CAD sistemlər, layihə həlli, həll qəbulu, həll qəbulu alqoritmi, alternativlər çoxluğu, funksional sxem, biliklər bazası</p>	<p><i>Baxılan işdə avtomatlaşdırılmış layihələndirmə sistemlərindən istifadə zamanı layihə həllərinin qəbul edilməsi metodikası və alqoritmləri tədqiq edilir. Bu məqsədlə həll qəbulunun dəstəklənməsi sisteminin strukturu müəyyənləşir və modeli qurulur. Həll qəbulunun dəstəklənməsi prosesinin alqoritmi işlənir. Alqoritmın hər bir addımında yerinə yetirilən məsələlər aydınlaşdırılır. Layihə həlli qəbulu prosesinə iterasiyalı sistem kimi baxılır. Zəif strukturlaşan məsələlərin formalaşdırılması prosesi analiz edilir. Layihələndirmənin başlanğıc mərhələsi ilə əlaqəli məsələlər və problemlər formalaşmasına mühəndis biliklərinin cəlb olunması təklif olunur</i></p>

Layihələndirmənin başlanğıc mərhələsi ilə əlaqəli məsələlər və problemlər zəif strukturlaşma sinfinə aiddir. Onların təsvirində keyfiyyət xarakterli informasiyalardan, onların həllinə isə ekspert biliklərinin cəlb olunması tələb edilir. Axtarış və variantların çoxkriteriyalı seçimi, onların qiymətləndirilməsi və s. kimi bir sıra intellektual funksiyaların ənənəvi ALS-ə verilməsi üçün ALS-ə həll qəbulunun dəstəklənməsi intellektual alt sisteminin əlavə edilməsi təklif edilir [1,2].

Həll qəbulunun dəstəklənməsi intellektual alt sisteminin əsas xüsusiyyətləri aşağıdakılardır [3]: zəif strukturlaşan və heç formalizə olunmayan məsələlərin həllinə istiqamətlənir, riyazi modellərin imkanları ilə verilən və biliklərə müdaxilə və emal üsullarının kəsişməsi ilə onların əsasında məsələlərin həlli, istifadəçi tələblərinə yüksək adaptivlik, müxtəlif formalı dialoqların manipulyasiyasına imkan verən interfeys və istifadəçi biliyinin çevik dəstəklənməsi.

Həll qəbul edənin alternativ seçim vəziyyətlərində bilik və bacarıq kifayət etmədikdə intellektual dəstəkləmə alt sistemindən, konstruktor sistemə təsir üçün istifadə edir. Həll qəbulunun dəstəklənməsi intellektual sistemə verilənlər və biliklər bazasından əlavə modellər bazası, biliklərin emalı bloku, istifadəçi interfeysi və idarəedici altsistem daxildir. Modellər bazasına modellər blokları, riyazi üsullarla reallaşan model və qrafik təsvir vasitələri və istifadəçi ilə mübadilə vasitələri daxildir.

Düzgün həll qəbulu – mümkün alternativlər çoxluğundan eləsinin seçilməsidir ki, bütün müxtəlif amillərin qeydiyyat ilə keyfiyyət funksiyasının cəmi optimallaşdırılsın. Mürəkkəb vəziyyətlərdə, nə vaxt ki, həll qəbulunun intensiv üsulları yararlı olmur və həll qəbulunun obyektiv əsaslandırılması tələb olunur, həll qəbulunun elmi üsullarına müraciət etmək zəruridir, yəni, məlum riyazi üsul və modellərdən istifadə olunmalıdır.

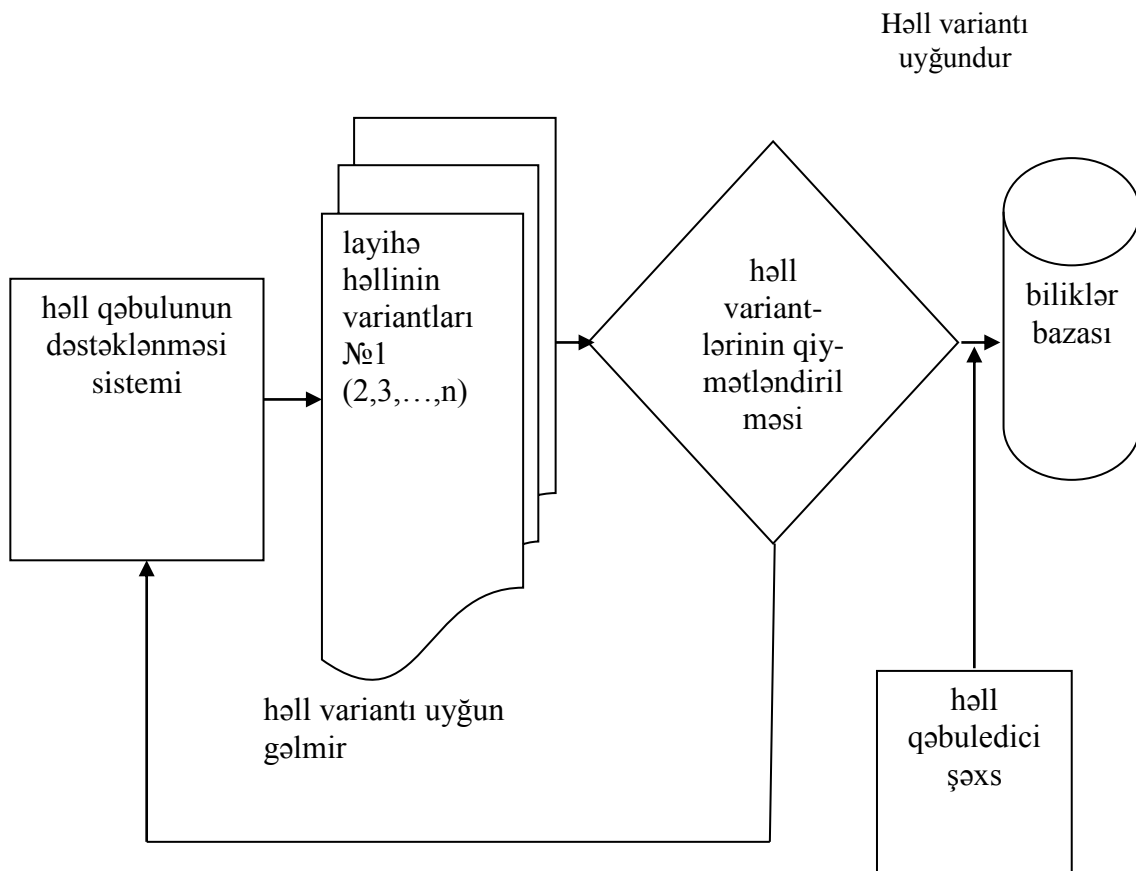
Yuxarı səviyyədə nisbətən az formalizə edilən və ya tamamilə subyektiv proseduralar yerləşdirilən seçim prosedurasının tam ierarxiyasını qurmaq olar: yuxarı səviyyənin proseduralarının formalizə edilməsi üçün, yəni yüksək kvalifikasiyalı mütəxəssisin təcrübəsinin modelləşdirilməsi məqsədi ilə müxtəlif modellər və üsullar işlənmişdir. Bunlara qeyri-səlis produksiya modelləri, qeyri-səlis vəziyyətlər modeli, təsnifat və kompozisiya modelləri, qeyri-səlis

münasibətlərə üstünlük verən modellər. Həll qəbulunun dəstəklənməsi sistemi dedikdə planlaşdırılan, proqnozlaşdırılan, layihələndirilən və idarə edilən zərif strukturlaşan və strukturlaşmayan məsələlərin formallaşdırılması və aktuallaşdırılması üçün nəzərdə tutulan informasiya sistemi başa düşülür.

Formal olaraq həll qəbulunu dəstəkləyən sistem sistemli analiz nöqtəyi-nəzərdən aşağıdakı şəkildə təsvir oluna bilər [4]:

$$\langle P, S, Z, K, SH, D, M, F, G, U \rangle, \quad (1)$$

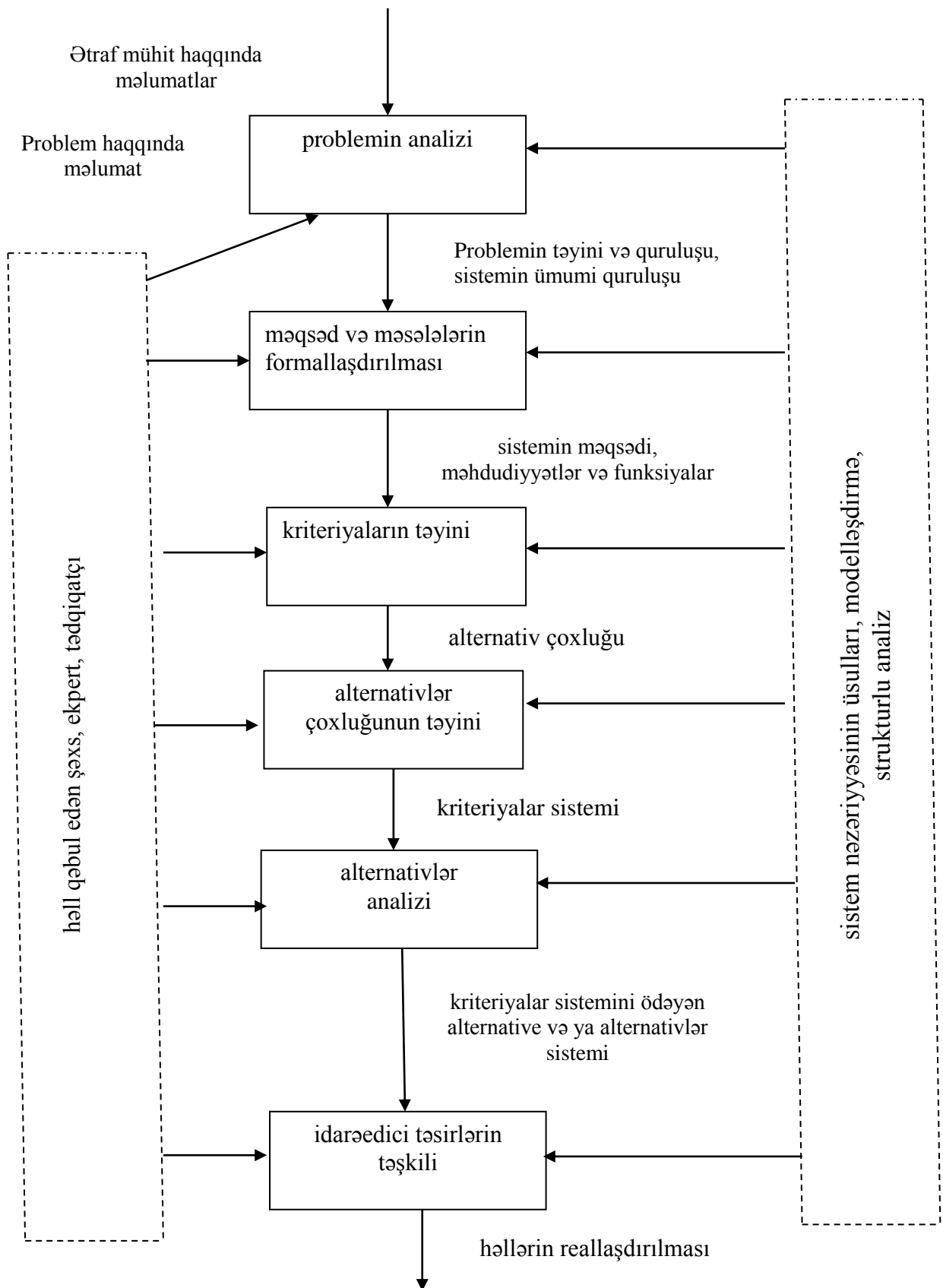
burada: P – riyazi problem, S – sistemin təyini, Z – sistemin məqsədinin təyini, K – sistemin səmərəlilik kriteriyası çoxluğu, SH – kriteriyaların ölçü şkalasının çoxluğu, D – sistemin tədqiqat qaydası, M – sistemin modelləşdirmə üsulu, A – alternativlər çoxluğu, F – alternativlər çoxluğunun kriteriyalar çoxluğuna inikası, G – həll qəbul edən şəxsin fərziyyələri çoxluğu, U – məqsəd funksiyasının növü.



Şəkil 1. Həll qəbulunun dəstəklənməsi iterasiyalı proses kimi

Müxtəlif mərhələlərdən ibarət həll qəbulunun dəstəklənməsinin ümumi alqoritmi şəkil 1.-də verilmişdir. Baxılan ierarxik ardıcılıq göstərir ki, sonrakı mərhələyə keçid əvvəlki mərhələnin reallaşmamasından çox çətindir, ancaq mümkün iterasiyalarla, yəni eyni bir mərhələnin və ya mərhələlər toplusunun bir neçə dəfə təkrarlanması nəticəsində nisbətən səmərəli nəticə almaq olar (şəkil 2.)

Həll qəbulu alqoritmində uyğun olaraq, onda göstərilən mərhələlərin hər birinə ayrılıqda baxaq.



Şəkil 2. Həll qəbulunun dəstəklənməsi alqoritmi.

Mərhələ 1. Problemin formallaşdırılması və analizi olan birinci mərhələnin reallaşdırılması üçün aşağıdakı addımların yerinə yetirilməsi zəruridir:

- xarici mühitin və idarə obyektlərinin monitorinqi;
- problemin meydana çıxması və formallaşdırılması;
- onun yenilik nöqtəyi-nəzərdən qiymətləndirilməsi;
- başqa problemlərlə qarşılıqlı əlaqənin təyini;
- verilən problem üzrə informasiyanın dolğunluğunun və lazımlılığının qiymətləndirilməsi;
- problemə görə informasiya ehtiyatlarının verilənlər bazasına daxil edilməsi

Mövcud problem haqqında alınmış məlumatlar, sistemin özü haqqında alınmış məlumatlar, sistemin özü haqqında dəqiq verilənlərin alınması məqsədilə analiz edilir, problemin ümumi quruluşunun yaranmasını və məsələnin məqsədinin və formalaşmasının təyini üçün istifadənin mümkünlüyü öyrənilir [2,5].

P_t problemini riyazi olaraq aşağıdakı kimi təyin etmək olar:

$$P_t = |A_t - A_t^0|, \quad (2)$$

burada A_t – t zaman anındakı həqiqi vəziyyət;

A_t^0 - t zaman anında arzu olunan vəziyyətdir.

Mərhələ 2. Məqsəd və məsələnin formallaşdırılması.

Bu mərhələdə sistemin (Z) məqsədi təyin edilir, qlobal məqsəd formalaşdırılır və məqsədə nail olmaq üçün məsələlər ardıcılığı işlənir:

- problemin həll olunma qabiliyyətinin təyini;
- problemin həll variantlarının konseptual işlənməsi;
- problemin həll variantlarının qiymətləndirilməsi;
- meydana çıxan problemlərin ayrı-ayrı məsələlərə dekompozisiyası;
- verbal səviyyədə məsələnin qoyuluşu;
- verbal səviyyədə şərtlərin, məqsədin və məsələlərin məntiqi analizi;
- istifadəçilər üçün məsələnin qoyuluşu.

Məqsədin formallaşdırılmasının sistemli analizi nöqtəyi-nəzərdən qeyri-səlis çoxluqlar nəzəriyyəsi və ekspert üsullarından istifadə nisbətən səmərəlidir. Məqsəd və məsələlərin təyini üçün qeyri-səlis çoxluqda hər hansı alternativ məqsədlər $A_z = \{\alpha_i\}$ çoxluğunun mövcud olması zəruridir.

Bu mərhələdə zəif formallaşdırılan üsulların istifadəsi də mümkündür. Məsələn, tərkib hissələri şəkildə hər bir variantın təsvirinin ifadəsi məqsədilə morfoloji analiz. Bu halda, Z məqsədinin riyazi funksiyası belə təsvir edilir[6]:

$$\psi_z = \bigcup_{i=1}^r \bigcup_{g=1}^{\ell} q(x_{j_g d_g}, x_{j_g d_g}^i), \quad (3)$$

burada, $x_{j_1 d_1}, \dots, x_{j_g d_g}$ i-ci mümkün olmayan toplunu təşkil edir, $r = |V|$,

$$q(b, e) = \begin{cases} 1, & \text{harada } b = e \\ 0, & \text{harada } b \neq e \end{cases}$$

Sonra məqsədlər çoxluğu formallaşdırılır:

$$A = \{x \in A_B \mid Q(x) = 0\}$$

Məqsədlər formallaşdırılan zaman, sistemli analizin prinsipləri: son məqsəd prinsipi, vahidlik və əlaqəlilik prinsipləri nəzərə alınmalıdır [3,7].

Mərhələ 3. Kriteriyaların seçilməsi və onların səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi. K kriteriyalar sistemi təşkil olunduğu zaman sadalanan təsvirlər ardıcılığı reallaşdırılır: məqsədə nail olunmaq üçün kriteriyalar sisteminin təyini, alt məqsədlərə görə kriteriyaların dekompozisiyası, kriteriyaların səmərəliliyinin qiymətləndirilməsi [8,9].

Səmərəli kriteriyalar sisteminin təşkili prosesi yaradıcı, pis formalizə olunan və hər halda fərdi yanaşma tələb edən subyektivlərdən ibarətdir. O, giriş verilənlərinin qeyri-müəyyənliyindən asılıdır. Ona görə, kriteriyalar çoxluğunun təyini üçün müxtəlif üsullardan istifadə olunması zəruridir.

Mərhələ 4. Alternativlər çoxluğunun təşkili. Həll qəbulu məsələlərində alternativlər konkret sistemləri özündə ifadə edir. Həll qəbul edən şəxsin evristik düşüncələrinə əsaslanan alternativlər çoxluğunun təşkili prosesini üç ardıcıl mərhələyə bölmək olar: alternativlər çoxluğunun generasiyası, alternativlərin strukturlaşdırılması, generasiya olunmuş alternativlər altçoxluğunun təyini. Alternativlərin qeyri-səlis çoxluğunun generasiyası üçün hər hansı (SV) xassələr təşkil edilir ki, ona linqvistik term kimi baxılır və onların köməyi ilə cütlər toplusu təşkil edilir:

$$SV = \frac{M_s(V_1)}{V_1}, \frac{M_s(V_2)}{V_{21}}, \dots, \frac{M_s(V_n)}{V_n},$$

burada $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ üzərində A qeyri-səlis çoxluğu verilən universal çoxluğudur; $M_s(V_i) - V_i$ elementinin A qeyri-səlis çoxluğuna mənsubiyyət dərəcəsidir.

Mərhələ 5. Alternativlərin analizi. Həll variantlarının analizi nisbətən vacib mərhələ hesab olunur. Bu zaman, alternativlərin optimallaşdırılmasının yerinə yetirilməsi və təklif olunan çoxluqlardan ən yaxşısının seçilməsi zəruridir. sistemli analiz nöqtəyi-nəzərdən alternativ həllərin analizi mərhələsinə daxildir: həllərin qeyri-müəyyənliyinin analizi, optimallaşdırma üsulları və həlledici funksiyasının təyini, mümkün həllərin qiymətləndirilməsi, optimal həllin seçilməsi [10,11,13].

Mərhələ 6. İdarəedici təsirlərin təşkili. Bu mərhələ, həll qəbulunun dəstəklənməsi mərhələlərinin sonuncusu hesab olunur. Bu mərhələdə həll qəbul edən şəxs, həll qəbulunu dəstəkləyən sistemin təklif etdiyi variantların reallaşdırılmasına istiqamətlənmiş bir sıra işləri yerinə yetirir.

HQDS reallaşdırılması üçün həll qəbulu nəzəriyyəsinin klassik sxemlərinin analizi mövcud alqoritmlər və üsulları strukturlaşdırılmasının, optimallaşdırılmasının və aktuallaşdırılmasının zəruriliyini meydana çıxartdı. Həll qəbulunun dəstəklənməsinin klassik sxemlərində böyük həcmdə informasiyalardan istifadənin zəruriliyi verilənlər bazasından və biliklər bazasından istifadəni zəruri edir [12,14], üsulların optimal tətbiqi, alternativlərin generasiyası, alternativlərin seçilməsi və analizi həll qəbulu prosesinin intellektuallaşdırılmasına imkan verir.

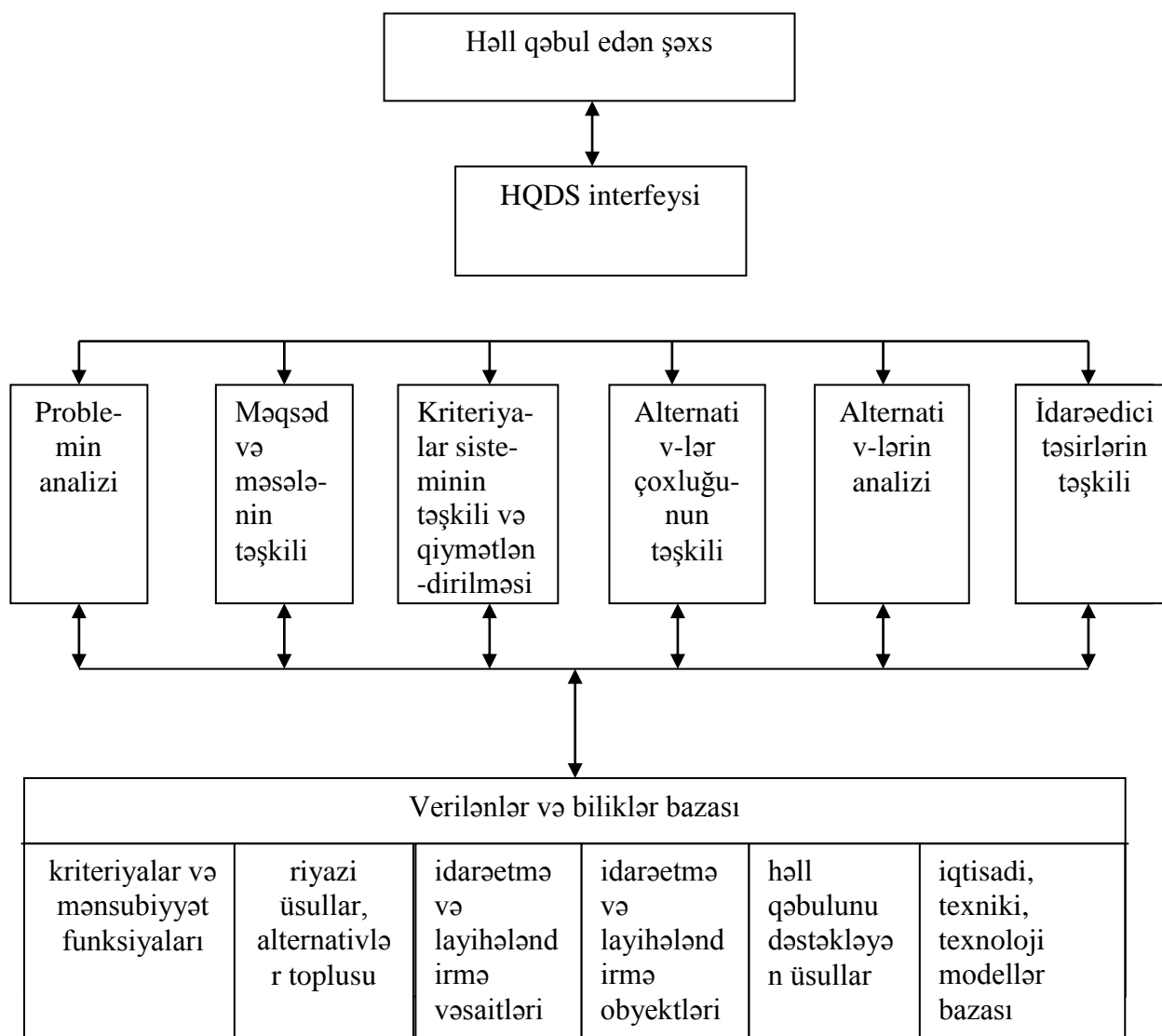
HQDS-in işlənmiş ümumi sxemi (şəkil3.) informasiya texnologiyasının müasir tələblərinə cavab verir. HQDS-in funksional quruluşu elə qurulmuşdur ki, müxtəlif predmet sahəsinə aid məsələyə baxılarkən sistem konkret vəziyyətə yenidən uyğunlaşır. Böyük həcmli verilənlər və biliklər bazasının qurulmasının təşkilinin mümkünlüyü, problemin predmet sahəsindən asılı həllərinin generasiya üsullarının kriteriyaları sisteminin təşkilini və həllərin seçilməsini nəzərə almaqla, müxtəlif məsələlərin həllinə görə toplanmış informasiyalardan istifadəyə imkan verir.

Verilən sxem çərçivəsində HQDS-nin reallaşdırılması, HQDS proqramlı modernizasiyası və HQDS verilənlər və biliklər bazasının doldurulması şərtlərinə görə məsələlərin dairəsini və miqdarını genişləndirir. Yerinə yetirilən işlər nəticəsində aşağıdakı nəticələr alınmışdır.

1. Həll qəbulunun klassik sxemi və üsullar sxemi əsasında həll qəbulu nəzəriyyəsi oblastında müasir tendensiyaların tələblərinə cavab verən HQDS-in funksional sxemi qurulmuşdur.

2. Həll qəbulunun bütün mərhələlərində riyazi və evristik qaydaların, üsulların analizi verilmişdir.

3. Hər mərhələdə istifadə olunan həll qəbulunun dəstəklənməsi üsulları, kompleks alqoritmlər toplusunun iştirakı müxtəlif predmet sahəsində funksional məsələlərin sayının kifayət qədər artmasına imkan verir.



Şəkil 3. Həll qəbulunu dəstəkləyən sistemin funksional sxemi.

Ədəbiyyat

- [1]. Семейкин, Е.С. Эволюционные алгоритмы поддержки принятия решений при управления сложными системами // Интеллектуальные системы (AIS OS) и интеллектуальные САПР: Сб. тр. Междунар. науч.-техн. Конф. – т.1. – М.: Физматмет, – 2005.– с.79-84.
- [2]. Черкасов, А.Н. Методологические аспекты построения систем поддержки принятия решений // Вестник ДГТУ, раздел «Управление, вычислительная техника и информатика». –2008. т.8. №3(38), –с.1-11.
- [3]. Палюх, Б.В. Оптимизация процедур поиска технологических решений в комплексной САПР ТП – АСУ ТП / Б.В.Палюх, Г.Б.Бурдо // Вестник ижевского государственного технического университета.–2010, №3 (47), –с.109-112.
- [4]. Лазарсон, Э.В. Формализация знаний и интеллектуальная поддержка принятия решений в задачах выбора// Интеллектуальные системы в производстве. –2006, №2, –с.4-14.
- [5]. Brinkkemper, J. A framework for requirements-driven software development / J.Brinkkemper, Solvberg A. Tropos// Info. Syst. Engg: State Art Res. Themes. –2000. LNCS 1. –pp. 261-273.

- [6]. Горобецкий, В.И. Базовая онтологиколлективного поведения автономных агентов и ее расширения / В.И.Горобецкий, В.В.Самойлов, Д.В.Троцкий // Известия РАН: Теория и системы управления, –2015. № 5. –с.102-121.
- [7]. Wooldridge, M. An Introduction to Multi-Agent Systems // John Wiley & Sons. –2009. –368 p.
- [8]. Шишкин, В.В., Кандулов В.М. Анализ механизмов параметризации с точки зрения паттернов проектирования // Тез. Док. 43-й науч.–тех. Конф. – Ульяновск, –2009. –с. 262.
- [9]. Губич, Л. Подходы к автоматизации проектирования на базе средств параметризации CAD/CAM – систем / Л.Губич, А.Прочорова // САПР и трафика.– 2000. № 12. – с.60-64.
- [10]. Гусейнов, А.Г. Алгоритм функционирования ассоциативного поиска в интеллектуальных САПР // Вестник компьютерных и информационных технологий,–М.: Спектр, –2012, № 6, –с.21-28.
- [11]. Гусейнов А.Г. Компьютерная технология проектирования нестандартных механических модулей с применением базы знаний // Вестник Воронежского технического университета. –2012, Том 8, № 7-1, –с.38-42.
- [12]. Гусейнов А.Г. Разработка методологической основы структурного моделирования ГПС с использованием базы знаний // Информационные технологии проектирование и производства, –М., –2014, № 2, –с. 63-68.
- [13]. Novak, M., Dolsak, B. and Jezemik, A., Expert Supporting System for Teaching Design // In Proceedings of the 6th International Design Conference – DESIGN00, –Dubrovnik, Croatia, – 2000, –pp. 477-482
- [14]. Smit, F.C. Engineering design support challenger // Cambridge university press.ALEDAM, – 2007, Vol. 21, Issue 01, –p.11-12.

Summary

Methodological factors in the development of a decision support system for project solution selection in computer-aided design systems

Huseynzade A.E.

Keywords: *CAD systems, project solution, decision acceptance, decision-making algorithm, set of alternatives, functional scheme, knowledge base.*

The study examines the methodology and algorithms of decision-making for project solutions when using computer-aided design (CAD) systems. For this purpose, the structure of the decision support system is defined and its model is developed. An algorithm for the decision-making support process is created. The tasks performed at each step of the algorithm are clarified. The project solution decision process is considered as an iterative system. The process of formulating weakly structured problems is analyzed. It is proposed to involve engineering knowledge in the formation of issues and problems related to the initial stage of design.

Резюме

Методологические факторы разработки системы поддержки принятия проектных решений в автоматизированных системах проектирования

Гусейнзаде А.Э.

Ключевые слова: *CAD-системы, проектное решение, принятие решений, алгоритм принятия решений, множество альтернатив, функциональная схема, база знаний.*

В рассматриваемой работе исследуются методика и алгоритмы принятия проектных решений при использовании автоматизированных систем проектирования. С этой целью определяется структура системы поддержки принятия решений и строится её модель. Разрабатывается алгоритм процесса поддержки принятия решений, при этом на каждом этапе алгоритма уточняются выполняемые задачи. Процесс принятия проектного решения рассматривается как итерационная система. Анализируется процесс формализации слабо структурированных задач. Предлагается привлечение инженерных знаний для формирования задач и решения проблем, связанных с начальным этапом проектирования.

Virtual mühitdə adaptiv tədris sisteminin yaradılması və intellektual qiymətləndirmə alqoritminin tətbiqi

¹Əhmədov Lütviyar Nurməmməd oğlu ORCID 0009-0004-7910-3922

²Osmanlı Təbriz Elcan oğlu ORCID 0009-0006-8338-8128

Milli Aviasiya Akademiyası, Bakı, Azərbaycan, 1 – dosent, f-r.e.n., 2 - elmi işçi
tosmanli@naa.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p><i>Məqalənin tarixçəsi</i> Daxilolma tarixi: 25.07.2025 Düzəliş tarixi: 06.11.2025 Qəbulolunma tarixi: 28.02.2026</p> <hr/> <p><i>Açar sözlər</i> adaptiv tədris, virtual təhsil mühiti, intellektual qiymətləndirmə, fərdiləşdirilmiş öyrənmə, süni intellekt tətbiqləri, tələbə fəaliyyət analizi</p>	<p><i>Bu tədqiqatda virtual təhsil mühitləri üçün tələbələrin fərdi fəaliyyət göstəricilərinə – davamiyyət, tapşırıq nəticələri və interaktivliyə – əsaslanan adaptiv tədris alqoritmı hazırlanmışdır. Ənənəvi təhsil sistemləri fərdi öyrənmə fərqlərini nəzərə almadığından, bu yanaşmaların effektivliyi məhduddur. Təklif olunan qaydalara əsaslanan alqoritm real vaxtda tələbə məlumatlarını qiymətləndirir və uyğun tədris strategiyalarını – məsələn, video ilə təkrar, əlavə testlər və ya çətinləşdirilmiş mövzular – tövsiyə edir. Modelin sınağı üçün 10 tələbədən ibarət simulyasiya edilmiş məlumat dəstindən istifadə olunmuş, nəticələr cədvəl və axın sxemi kimi vizual vasitələrlə təhlil edilmişdir. Alqoritm zəif, orta və yüksək nəticə göstərən tələbələri düzgün müəyyənləşdirərək müvafiq tədris strategiyaları təqdim etmişdir. Bu adaptiv yanaşma təhsilin fərdiləşdirilməsini dəstəkləyir və təhsil keyfiyyətini yüksəldir. Vizual və statistik analizlər modelin effektivliyini sübut etmiş və intellektual sistemlərin virtual təhsildə tətbiqinin tələbə nailiyyətlərini artırmaqda mühüm rol oynaya biləcəyini göstərmişdir</i></p>

Giriş

Rəqəmsal transformasiya nəticəsində təhsil sistemi sürətlə dəyişməkdədir. Virtual texnologiyaların, xüsusilə də süni intellekt əsaslı platformaların inkişafı, tədris prosesini daha fərdiləşdirilmiş və səmərəli hala gətirmək imkanı yaratmışdır. Ənənəvi tədris metodları çox zaman tələbələrin fərdi öyrənmə tərzini və qabiliyyətlərini nəzərə almadığı üçün, bu sistemlərdə fərdi yanaşma imkanları məhduddur [1].

Adaptiv tədris sistemləri isə tələbələrin real vaxtda fəaliyyətlərini izləyərək, onların nəticələrinə uyğun olaraq tədris məzmununu və üsullarını dəyişmək qabiliyyətinə malikdir. Bu yanaşma, tələbələrin zəif və ya güclü tərəflərini daha dəqiq müəyyənləşdirməyə və onların fərdi inkişafına dəstək olmağa imkan verir [2]. Adaptiv sistemlər süni intellekt, təbii dil işlənməsi (TDİ), ekspert sistemləri və maşın öyrənməsi texnologiyalarına əsaslanaraq, tələbə davranışlarını analiz edir və bu analizlər əsasında tədris mühitini avtomatik şəkildə uyğunlaşdırır [3].

Bundan əlavə, virtual mühitlərdə tələbənin fəaliyyətinin qiymətləndirilməsi də yeni metod və alqoritmlərin tətbiqini tələb edir. Ənənəvi qiymətləndirmə modelləri yalnız yekun nəticələrə əsaslanır, lakin intellektual yanaşma tələbənin fəaliyyət, davamiyyət və interaktivlik kimi göstəricilərini də nəzərə almağı mümkün edir [4].

Bu məqalədə məqsəd, tələbənin virtual təhsil mühitindəki fərdi davranış göstəricilərinə əsaslanan adaptiv tədris alqoritmını təqdim etmək və bu yanaşmanın təhsilin keyfiyyətinə təsirini intellektual qiymətləndirmə vasitəsilə araşdırmaqdır.

Problemin qoyuluşu. Virtual təhsil mühitləri geniş istifadə olunsa da, bu sistemlərin əksəriyyəti bütün tələbələr üçün eyni məzmun və metodlardan istifadə edir. Halbuki tələbələrin öyrənmə tempi, diqqət səviyyəsi, fəaliyyət aktivliyi və bilik səviyyəsi bir-birindən əhəmiyyətli

dərəcədə fərqlənir. Bu fərqliliklərin nəzərə alınmaması tədris prosesinin effektivliyini azaldır və təhsil keyfiyyətinə mənfi təsir göstərə bilər [5].

Mövcud sistemlərdə tətbiq edilən qiymətləndirmə modelləri əsasən yekun test nəticələri və tapşırıq ballarına əsaslanır. Lakin bu yanaşma tələbənin tədris prosesində göstərdiyi real vaxtli fəaliyyətləri – məsələn, dərslərdə iştirak, müzakirələrdə fəallıq, mövzuya maraq və fərdi inkişaf meyilləri – nəzərə almır. Bu isə nəticələrin obyektivliyini şübhə altına alır və tələbəyə uyğun tədris istiqamətinin seçilməsini çətinləşdirir [6].

Eyni zamanda, təhsil sistemində fərdi yanaşmanın olmaması zəif nəticə göstərən tələbələr üçün əlavə resursların təklif olunmaması ilə nəticələnir. Halbuki süni intellektə əsaslanan adaptiv sistemlər, bu cür tələbələri erkən mərhələdə aşkar edə və onların ehtiyaclarına uyğun tədris strategiyası təklif edə bilər [7].

Bu baxımdan, tədqiqatın əsas problemi aşağıdakı suallarda cəmlənir:

- Virtual tədris mühitində tələbənin fərdi göstəricilərini necə toplamaq və təhlil etmək olar?
- Bu göstəricilərə əsaslanan hansı alqoritmlər vasitəsilə adaptiv tədris sistemi qurula bilər?
- İntellektual qiymətləndirmə hansı üsullarla həyata keçirilə və tədris prosesinə necə inteqrasiya oluna bilər?

Bu problemləri həll etmək üçün tələbənin fəaliyyətinə əsaslanan sadə və tətbiq edilə bilən adaptiv alqoritm hazırlanmış və bu yanaşmanın təhsilin keyfiyyətinə təsiri qiymətləndirilmişdir.

Metodologiya. Məqalədə məqsəd tələbələrin virtual tədris mühitində fərdi fəaliyyət göstəricilərinə əsaslanan adaptiv tədris alqoritminin hazırlanması və onun tətbiqi ilə intellektual qiymətləndirmənin həyata keçirilməsidir.

Təklif olunan metodologiya əsasən aşağıdakı prinsiplərə əsaslanır:

- Tələbənin davranışına dair məlumatların toplanması və analiz olunması
- Bu məlumatlara əsaslanan qərarların verilməsi üçün sadə alqoritmın yaradılması
- Tətbiq olunan alqoritmın nəticələrinin vizual və statistik şəkildə qiymətləndirilməsi

Cədvəl (1)-də tədris sistemi üçün tələbələrdən toplanılan dörd əsas məlumat qeyd edilmişdir.

Cədvəl 1.

Tələbə fəaliyyət göstəriciləri və onların təsviri

Parametr	Təsviri
Davamiyyət (%)	Tələbənin dərslərdə iştirak faizi
Tapşırıqların nəticəsi (%)	Tələbənin əvvəlki tapşırıqlardan aldığı ortalama bal
İnteraktivlik (%)	Forumlarda, suallarda və müzakirələrdə iştirak səviyyəsi
Öyrənmə üsulu	Tələbənin üstünlük verdiyi təlim növü (vizual, mətn əsaslı, interaktiv və s.)

Tələbənin virtual təhsil mühitindəki fəaliyyət göstəricilərinə əsaslanaraq onun tədris ehtiyaclarını müəyyənləşdirən adaptiv tədris alqoritmı hazırlanmışdır. Bu alqoritm əsasən qaydalar əsasında qərarvermə (ing. rule-based decision-making) yanaşmasına söykənir və süni intellektin ilkin forması kimi qəbul edilə bilər. Belə ki, sistem istifadəçinin fərdi göstəricilərinə əsaslanaraq onun bilik səviyyəsini və öyrənmə üsulunu qiymətləndirir, və nəticədə uyğun tədris strategiyası təklif edir. Əsas məqsəd tələbənin öyrənmə effektivliyini artırmaq və təlimin fərdiləşdirilməsini təmin etmək üçün onun tədris davranışına uyğun avtomatik tövsiyə sistemi yaratmaqdır.

Sistemdə istifadə olunan məlumatlar 3 əsas kateqoriyaya bölünür:

1. İştirak göstəriciləri – dərslərdə iştirak faizi
2. Akademik göstəricilər – əvvəlki tapşırıqlardan əldə olunan nəticələr
3. Fəallıq göstəriciləri – interaktivliyə əsaslanan forum və müzakirə aktivliyi

Bu göstəricilər sistem tərəfindən rəqəmsal şəkildə toplanır və avtomatik emal olunur. Hər parametr 0–100% aralığında ölçülür.

Şəkil (1)-də alqoritmın psevdokodu təsvir edilmişdir.

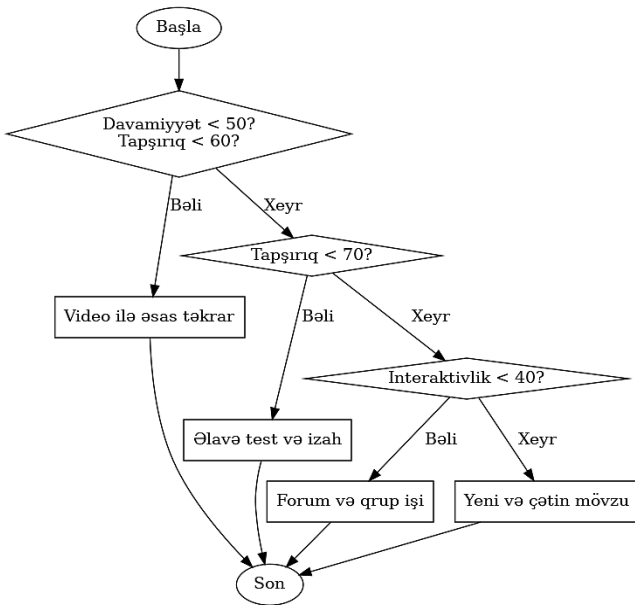
```
def adaptiv_tədris(tələbə):
    if tələbə["davamiyyət"] < 50 and
        tələbə["tapşırıq_nəticə"] < 60:
        təklif = "Əsas mövzuya yenidən baxmaq üçün
            video dərslər"
    elif tələbə["tapşırıq_nəticə"] < 70:
        təklif = "Əlavə testlər və interaktiv
            izahlarla dəstək"
    elif tələbə["interaktivlik"] < 40:
        təklif = "Diskussiya forumlarına yönləndirmə
            və qrup layihələri"
    else:
        təklif = "Yeni mövzu və çətinləşdirilmiş
            tapşırıqlar"
    return təklif

# Tələbə nümunəsi
telebe1 = {
    "davamiyyət": 45,
    "tapşırıq_nəticə": 55,
    "interaktivlik": 30
}

print("Təklif:", adaptiv_tədris(telebe1))
```

Şəkil 1. Alqoritmın psevdokodu

- Qeyri-səlis məntiq – qeyri-müəyyən yanaşma ilə qiymətləndirmə [8];
- Maşın öyrənməsi – tələbə məlumatlarının təhlili əsasında öyrənən modelin qurulması [9];
- Gücləndirici öyrənmə – tələbənin zamanla dəyişən davranışına uyğunlaşma.



Şəkil 2. Adaptiv tədris alqoritmının sxemi

tələbələrə fəaliyyət göstəriciləri rəng dərəcəsinə görə sıralanmışdır: tünd rənglər yüksək göstəriciləri, açıq rənglər isə aşağı nəticələri əks etdirir. Bu təqdimat həm müəllimlər, həm də intellektual sistemlər üçün qərarvermə prosesini asanlaşdırır.

Alqoritm aşağıdakı məntiq əsasında qərar verir:

- Əgər tələbənin həm davamiyyəti, həm də tapşırıq nəticəsi aşağıdırsa, bu onun mövzunu anlamadığını və ya tədris prosesindən uzaq olduğunu göstərə bilər. Bu halda əsas təməl mövzulara yenidən baxmaq üçün video dərslər tövsiyə olunur.

- Əgər tələbənin tapşırıq nəticəsi zəif, lakin davamiyyəti orta və ya yüksəkdirsə, bu onun iştirak etdiyini, lakin materialı tam mənimsəmədiyini göstərir. Bu zaman əlavə izahlarla test və məşqlər təqdim edilir.

- Əgər tələbənin interaktivliyi aşağıdırsa, yəni o dərslər zamanı suallarda və müzakirələrdə passivdirsə, sistem onu daha çox forumlara, qrup işlərinə və interaktiv layihələrə yönləndirir.

- Əgər tələbənin bütün göstəriciləri yaxşıdırsa, sistem ona çətinləşdirilmiş tapşırıqlar və yeni mövzular təqdim edir.

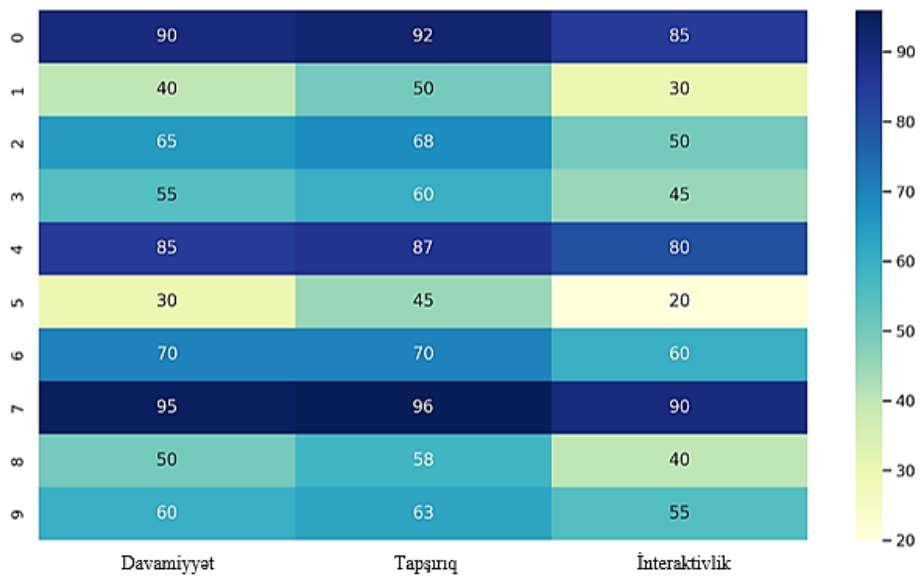
Bu alqoritm ilkin mərhələ üçün effektivdir, lakin daha irəli mərhələlərdə aşağıdakılarla əvəz oluna və genişləndirilə bilər:

- Qərar ağacı – avtomatik qaydaların statistik əsasda çıxarılması;

Şəkil (2)-də alqoritmın qərar məntiqini əks etdirən **axın sxemi** göstərilmişdir. Bu sxemdə adaptiv tədris alqoritmının necə işlədiyi vizual şəkildə göstərilərək, alqoritmın əsas qərar şaxələri və nəticə olaraq təklif edilən tədris strategiyaları əks etdirilir.

Təklif olunan adaptiv tədris alqoritmının funksionallığını qiymətləndirmək məqsədilə 10 tələbəyə dair simulyasiya edilmiş məlumatlar əsasında eksperimental testlər aparılmışdır. Bu testlərdə tələbələrə davamiyyəti, tapşırıq nəticələri və interaktivlik göstəriciləri əsas götürülmüşdür. Hər bir tələbə üçün bu göstəricilər sistemə daxil edilmiş və alqoritm tərəfindən uyğun tədris tövsiyəsi avtomatik şəkildə müəyyən olunmuşdur.

Bu məlumatlar üzərində cədvəl yaradılmışdır. Bu vizual cədvəl vasitəsi ilə tələbələr arasında fərqlər daha asan görünür və davranış meyllərinin təhlili rahatlaşır. Şəkil (3)-də



Şəkil 3. Tələbə fəaliyyət göstəriciləri üzrə cədvəl.

Təcrübə nəticəsində məlum olmuşdur ki, aşağı göstəricilərə malik olan tələbələr üçün sistem “Video ilə əsas təkrar” təklifini vermişdir. Məsələn, 2-ci və 6-cı tələbələr həm davamiyyətdə, həm də tapşırıq nəticələrində zəif göstəricilər göstərdiklərinə görə alqoritm tərəfindən təkrar tədris məzmunlarına yönləndirilmişdir. Bu, onların mövzuya kifayət qədər bələd olmadıqlarını və əsas biliklərin təkrarlanmasına ehtiyac duyduqlarını göstərir.

Orta səviyyəli nəticələrə malik tələbələr, məsələn 3-cü, 4-cü, 9-cu və 10-cu tələbələr isə “Əlavə test və izah” tövsiyəsi almışdır. Bu tələbələrdə davamiyyət və interaktivlik qənaətbəxş səviyyədə olsa da, tapşırıq nəticələri onların mövzunu tam mənimsəmədiyini göstərmişdir. Alqoritm bu tələbələr üçün əlavə izahlı tapşırıqlar və praktik testlər təklif etmişdir.

Digər tərəfdən, yüksək göstəricilərə malik tələbələr – məsələn 1-ci, 5-ci, 7-ci və 8-ci tələbələr – sistem tərəfindən “Yeni və çətin mövzu” səviyyəsinə keçməyə uyğun hesab edilmişdir. Bu tələbələrdə davamiyyət 85–95%, tapşırıq nəticələri isə 87–96% aralığında olmuşdur. Bu da onların əvvəlki təlim mərhələlərini uğurla başa vurduqlarını və daha yüksək səviyyəli biliklərə keçməyə hazır olduqlarını göstərir.

Bu məlumatlar əsasında qurulmuş cədvəldə (Şəkil 3) tələbələrin fəaliyyət göstəricilərini rəng dərəcəsinə görə vizual şəkildə təqdim etmişdir. Burada tünd rənglər yüksək nəticələri, açıq rənglər isə aşağı göstəriciləri əks etdirmişdir. Vizual təqdimat sistemin düzgün işlədiyini və tələbələr arasındakı fərqlərin dəqiq müəyyənləşdirildiyini aydın şəkildə göstərmişdir.

Nəticə. Bu tədqiqatda virtual təhsil mühitində tələbələrin fərdi öyrənmə göstəricilərinə əsaslanaraq tədris prosesinin adaptiv şəkildə təşkili məqsədilə intellektual yanaşma tətbiq edilmişdir. Hazırlanmış sadə, lakin funksional adaptiv alqoritm vasitəsilə tələbənin davamiyyəti, tapşırıq nəticəsi və interaktivlik səviyyəsi təhlil olunmuş və bu göstəricilər əsasında ona fərdi tədris tövsiyəsi təqdim edilmişdir.

Alqoritmin tətbiqi göstərdi ki, fərdi fəaliyyət göstəricilərinə əsaslanan tədris tövsiyələri tələbələrin real vəziyyətinə uyğun gəlir. Bu da adaptiv tədris yanaşmasının təhsilin fərdiləşdirilməsi və keyfiyyətinin yüksəldilməsi baxımından nə qədər effektiv ola biləcəyini sübut edir.

Eksperimental nəticələr göstərdi ki, alqoritm tələbələrin real fəaliyyətlərinə uyğun qərarlar vermək qabiliyyətinə malikdir. Yüksək göstəriciləri olan tələbələr daha çətin məzmunlara yönləndirilmiş, zəif nəticə göstərənlərə isə əsas mövzuların təkrarı və əlavə izahlar təqdim olunmuşdur. Bu yanaşma tələbənin tədris prosesində daha effektiv şəkildə dəstəklənməsinə və fərdiləşdirilmiş öyrənmənin tətbiqinə şərait yaratmışdır.

Aparılan analizlər vizual təhlillərlə dəstəklənmiş, tələbələrin göstəriciləri arasında aydın fərqlər vizual olaraq müəyyən edilmişdir. Bu isə adaptiv sistemlərin həm müəllimlər, həm tələbələr, həm də intellektual qiymətləndirmə sistemləri üçün nə qədər faydalı ola biləcəyini sübut edir.

Ədəbiyyat

- [1]. Brusilovsky, P. User Models for Adaptive Hypermedia and Adaptive Educational Systems / P.Brusilovsky, E.Millán, // In: The Adaptive Web. Springer. –2007
- [2]. Durlach, P.J., & Ray, J.M. Adaptive technologies for training and education / P.J.Durlach, J.M.Ray // Cambridge University Press. –2011
- [3]. Nkambou, R. Advances in Intelligent Tutoring Systems / R.Nkambou, J.Bourdeau, R.Mizoguchi // Springer. –2010
- [4]. Ma, W. Intelligent Tutoring Systems and Learning Outcomes: A Meta-Analysis / W.Ma, O.O.Adesope, J.C.Nesbit, Q.Liu, // Journal of Educational Psychology, –2014, 106(4), –p.901-918.
- [5]. Kay, J. MOOCs: So Many Learners, So Much Potential / J.Kay, P.Reimann, E.Diebold, [et al.] // IEEE Intelligent Systems. –2013
- [6]. Conati, C. Student modeling: Supporting personalized instruction, from problem-solving to exploratory open-ended activities / C.Conati, S.Kardan, // AI Magazine. –2013
- [7]. Graesser, A.C. AutoTutor: An intelligent tutoring system with mixed-initiative dialogue / A.C.Graesser, P.Chipman, B.C.Haynes [et al.] // IEEE Transactions on Education. 2005
- [8]. Osmanlı, T.E. Virtual texnologiya və süni intellektin təhsildə rolu / T.E.Osmanlı, L.N.Əhmədov // Fevral məruzələri, –2025, –p.195-197.
- [9]. Osmanlı T.E., Rəfizadə Ü.R. Virtual texnologiyaların təhsilin keyfiyyətinə təsirinin intellektual qiymətləndirilməsi // Azərbaycan Texnologiya Universiteti, “Dördüncü sənaye inqilabı dövründə elm və texnologiyaların mövcud vəziyyəti və inkişaf perspektivləri” mövzusunda Beynəlxalq Elmi-Praktik Konfrans, –Gəncə, 6-7 may, –2025, –s.193-195.

Summary

Development of an adaptive learning system in a virtual environment and implementation of an intelligent assessment algorithm Akhmadov L.N., Osmanli T. E.

Keywords: *adaptive learning, virtual learning environment, intelligent assessment, personalized learning, artificial intelligence applications, student performance analysis*

In this study, an adaptive learning algorithm was developed for virtual education environments based on students' individual performance indicators such as attendance, assignment scores, and interactivity. Traditional educational systems often fail to address personal learning differences, leading to limited engagement and suboptimal results. The proposed rule-based algorithm evaluates real-time student data and provides customized learning recommendations such as video review, additional tests, or advanced content. A simulated dataset of 10 students was used to test the model, and visual tools such as a heatmap and decision flowchart were employed for analysis. Results showed that the algorithm correctly identified weak, average, and strong performers and suggested appropriate educational strategies. This adaptive approach supports the personalization of learning processes and improves educational quality. The visual and statistical assessments confirmed the effectiveness of the model, indicating that integrating intelligent systems into virtual learning platforms can significantly enhance student engagement and success.

Резюме

Разработка адаптивной системы обучения в виртуальной среде и внедрение алгоритма интеллектуальной оценки

Ахмедов Л.Н., Османлы Т. Э.

Ключевые слова: *адаптивное обучение, виртуальная образовательная среда, интеллектуальная оценка, персонализированное обучение, приложения искусственного интеллекта, анализ успеваемости студентов*

В данном исследовании был разработан адаптивный алгоритм обучения для виртуальных образовательных сред на основе индивидуальных показателей успеваемости студентов, таких как посещаемость, оценки по заданиям и интерактивность. Традиционные образовательные системы часто не учитывают личные различия в обучении, что приводит к ограниченному вовлечению студентов и субоптимальным результатам. Предложенный алгоритм, основанный на правилах, оценивает данные студентов в реальном времени и предоставляет индивидуализированные рекомендации по обучению, такие как пересмотр видео, дополнительные тесты или продвинутый контент. Для тестирования модели использовался смоделированный набор данных из 10 студентов, а для анализа применялись визуальные инструменты, такие как тепловая карта и блок-схема принятия решений. Результаты показали, что алгоритм правильно идентифицировал слабых, средних и сильных студентов, а также предложил соответствующие образовательные стратегии. Этот адаптивный подход поддерживает персонализацию учебного процесса и улучшает качество образования. Визуальная и статистическая оценка подтвердила эффективность модели, указывая на то, что интеграция интеллектуальных систем в виртуальные образовательные платформы может значительно повысить вовлеченность студентов и их успех.

UOT 004.8:004.82:62

DOI 10.54758/16801245_2026_26_1_96

Mühəndislikdə süni intellektin rolu, mövcud yanaşmalar və gələcək istiqamətlər**Hüseynova Leyla İlham qızı** ORCID 0009-0006-4705-709X*Sumqayıt Dövlət Universiteti, Sumqayıt, Azərbaycan, müəllim*
leyla.huseynova@sdu.edu.az

MƏQALƏ HAQQINDA MƏLUMAT	XÜLASƏ
<p>Məqalənin tarixçəsi Daxilolma tarixi: 17.10.2025 Düzəliş tarixi: Qəbul olunma tarixi:</p>	<p><i>Təqdim olunan məqalədə süni intellekt və maşın öyrənməsinin mühəndislik sistemlərinə – avtonom nəqliyyat vasitələri, ağıllı idarəetmə sistemləri və materialların aşkar edilməsi kimi sahələrə – inteqrasiyası sistemli şəkildə təhlil edilir, eyni zamanda bu sistemlərin funksional təhlükəsizliyinin və istismar etibarlılığının təmin olunmasına dair mövcud yanaşmalar araşdırılır.</i></p>
<p>Açar sözlər Süni intellekt, avtonom sistemlər, kompüter elmləri, süni intellekt mühəndisliyi, materiallar və istehsal texnologiyaları, etika və məsuliyyət</p>	<p><i>Aparılan təhlil nəticəsində mövcud elmi nailiyyətlər və aktual problemlər ümumiləşdirilir, həmçinin mühəndislik elmləri ilə süni intellekt texnologiyaları arasında səmərəli və davamlı qarşılıqlı əlaqənin formalaşdırılması üçün əsas elmi istiqamətlər müəyyən olunur.</i></p>

Giriş

2000-ci illərin əvvəllərində DARPA tərəfindən təşkil olunan Grand Challenge təşəbbüsü avtonom sistemlərin real mühitdə sınaqdan keçirilməsi üçün mühüm texnoloji impuls rolunu oynamışdır. Bu təşəbbüs süni intellekt alqoritmlərinin sensor sistemləri, yerləşdirilmiş hesablama platformaları və idarəetmə mexanizmləri ilə sıx inteqrasiyasının zəruriliyini açıq şəkildə ortaya qoymuşdur [4]. Bu təşəbbüs avtonom sistemlər sahəsində süni intellekt, real vaxt hesablama və kiber-fiziki sistemlərin inkişafını sürətləndirmək məqsədi daşıyırdı.

Gözləntilərin yüksək olmasına baxmayaraq, əldə olunan nəticələr bir sıra ciddi texniki məhdudiyyətləri üzə çıxarmışdır [4], [5]. İlkin mərhələdə sınaqdan keçirilmiş 21 nəqliyyat vasitəsindən yalnız 15-i final mərhələsinə keçə bilməmiş və onların heç biri müəyyən olunmuş marşrutu tamamlaya bilməmişdir. Qeyd edilən uğursuzluqların böyük əksəriyyəti yüksək səviyyəli süni intellekt alqoritmlərinin çatışmazlığı ilə deyil, sensorların etibarlılığı, aktuator nasazlıqları, yerləşdirilmiş aparat təminatının dayanıqlılığı, proqram və aparat komponentləri arasında inteqrasiya problemləri, eləcə də real istismar şəraitində kifayət qədər sınaqların aparılmaması ilə bağlı olmuşdur. Bu fakt kompüter mühəndisliyi baxımından mühüm bir nəticəni ortaya qoymuşdur: intellektual alqoritmlər müvafiq hesablama arxitekturaları və sıx inteqrasiya olunmuş sistem dizaynı olmadan effektiv və etibarlı fəaliyyət göstərə bilməz [1], [2].

DARPA 2005-ci ildə müsabiqəni daha mürəkkəb marşrut və artırılmış mükafat fondu ilə yenidən təşkil etmişdir. Bu dəfə beş avtonom nəqliyyat vasitəsi marşrutu uğurla başa vurmuşdur ki, bu da qavrayış sistemlərinin təkmilləşdirilməsi, sensor məlumatlarının birləşdirilməsi (sensor fusion), real vaxt rejimində qərar qəbul etmə mexanizmlərinin inkişafı və nasazlıqlara davamlı yerləşdirilmiş hesablama sistemlərinin tətbiqi sahəsində mühüm irəliləyişlərin əldə edildiyini göstərmişdir. Bu nailiyyətlər sonrakı mərhələlərdə müasir avtonom nəqliyyat vasitələrinin və kiber-fiziki sistemlərin inkişafı üçün əsas texnoloji baza rolunu oynamışdır [5], [10].

Daha geniş kontekstdə, süni intellekt və maşın öyrənməsi texnologiyalarının yetkinləşməsi ilə kompüter mühəndisləri bu yanaşmaların ölçmə, hesablama, qərar qəbul etmə və icra mexanizmlərinə malik mühəndislik sistemlərinə inteqrasiyasına artan maraq göstərməyə başlamışdır. Avtonom nəqliyyat vasitələri, robototexnika, istehsal prosesləri və intellektual

infrastruktur sistemlərində süni intellektin proqram və aparat təminatı ilə birgə tətbiqi mühüm transformativ potensiala malikdir [6], [10]. Bu potensial yalnız süni intellekt alqoritmlərinin mövcud sistemlərə əlavə olunması ilə deyil, eyni zamanda məlumatyönlü modellər, hesablama arxitekturaları və mühəndislik məhdudiyətləri arasında yaranan sinerji ilə şərtlənir [9], [10].

Lakin DARPA müsabiqələrinin təcrübəsi göstərir ki, bu istiqamətdə bir sıra ciddi problemlər mövcuddur. Real istismar mühitlərində sistemlərin etibarlılığının, təhlükəsizliyinin, dayanıqlılığının və proqnozlaşdırılan performansının təmin edilməsi aparat dəyişkənliyi, sensor məlumatlarının qeyri-müəyyənliyi, real vaxt məhdudiyətləri, sistemlərin yoxlanılması və verifikasiya prosedurları, eləcə də süni intellekt əsaslı qərar mexanizmlərinin izah edilə bilməsi kimi məsələlərin kompleks şəkildə həllini tələb edir. Bu problemlər xüsusilə təhlükəsizlik baxımından kritik olan kompüter mühəndisliyi sistemlərində daha qabarıq şəkildə özünü göstərir.

Süni intellektlə dəstəklənən sistemlərə marağın sürətlə artdığı mövcud şəraitdə, süni intellektin kompüter mühəndisliyi ilə inteqrasiyasının imkan və məhdudiyətlərinin sistemli şəkildə təhlil edilməsi xüsusi aktualıq kəsb edir. Bu məqalədə “mühəndislik əsaslı süni intellekt sistemi” anlayışı ölçmə məlumatlarından, sahə biliyindən və maşın öyrənməsi metodlarından istifadə etməklə yanaşı, təhlükəsizlik, etibarlılıq, dayanıqlılıq və təmin olunmuş performans tələblərinə cavab verən kompüter əsaslı sistem kimi müəyyən edilir.

Avtonom sistemlər və kiber-fiziki hesablama platformaları (CPS)

Ümumi baxış və kompüter mühəndisliyi konteksti

Mühəndislik əsaslı süni intellekt sistemləri arasında ən çox diqqət cəlb edən tətbiqlərdən biri avtonom nəqliyyat vasitələridir. Quruda, havada və dənizdə insan operatoru olmadan fəaliyyət göstərə bilən bu sistemlər riskli mühitlərdə missiyaların icrası, qəza ehtimalının azaldılması, uzunmüddətli fasiləsiz istismar və əməliyyat xərclərinin optimallaşdırılması kimi üstünlüklər vəd edir.

Kompüter mühəndisliyi baxımından bu üstünlüklər yalnız “AI alqoritminin gücü” ilə izah edilmir. Real nəticə proqram–aparat birgə layihələndirməsi, etibarlı sensor infrastrukturunu, real vaxt hesablama, xəyata davamlılıq və təhlükəsizlik-kritik sistem tələblərinin eyni vaxtda təmin olunması ilə əldə edilir. Buna görə də avtonom nəqliyyat texnologiyaları mühəndislik və süni intellekt arasında sinerjinin müzakirəsi üçün metodoloji baxımdan əlverişli başlanğıc nöqtəsidir.

Avtonom avtomobillər: qavrayış, sensorların inteqrasiyası və real vaxt qərarvermə

DARPA Grand Challenge müsabiqəsindən sonra avtonom yerüstü nəqliyyat sistemləri əhəmiyyətli inkişaf mərhələsi keçmişdir. Hazırda müxtəlif şəhərlərdə sürücüsüz taksilər real mühitdə sınaq və məhdud istismar rejimlərində fəaliyyət göstərir [4], [5]. Məsələn, Waymo-nun robotaksi xidməti ABŞ-ın bir sıra şəhərlərində tətbiq ssenarilərinə çıxarılmışdır [6].

Bu tip sistemlərdə kompüter mühəndisliyi baxımından əsas irəliləyişlər avtonom idarəetmə texnoloji yığınının (texniki modullar zəncirinin) təkmilləşdirilməsi ilə bağlıdır. Yığın, ümumilikdə, aşağıdakı mərhələləri əhatə edir:

1. Sensor sistemi: kamera, lidar/radar alternativləri, IMU, GNSS və s.;
2. Sensor məlumatlarının inteqrasiyası (sensor fusion): çoxmənbəli məlumatların birləşdirilməsi [2], [9];
3. Qavrayış modulları: obyekt tanıma, izləmə, semantik segmentasiya;
4. Lokallaşdırma və xəritələmə: mövqenin dəqiq təyini və xəritə ilə uyğunlaşdırma;
5. Planlaşdırma və idarəetmə: trayektoriyanın planlaşdırılması, model proqnozlaşdırıcı idarəetmə və s.;
6. Real vaxt icrası və təhlükəsizlik monitorinqi: gecikmələrin idarə olunması və risklərin izlənməsi.

Kompüter mühəndisliyi baxımından bu hadisələr aşağıdakı mühüm məqamı göstərir: problem çox vaxt “neyron şəbəkə niyə səhv etdi?” sualından daha genişdir. Qəza və nasazlıqlar, adətən, sensor etibarlılığı, kalibrəmə, məlumat keyfiyyəti, mühit uyğunsuzluğu (domain shift), real vaxt gecikmələri, aktuatorlardan geriəlaqə və təhlükəsizlik məhdudiyətləri kimi komponentlərin

qarşılıqlı təsiri nəticəsində formalaşır. Başqa sözlə, sistemin zəifliyi tək bir moduldan deyil, çox vaxt kiber-fiziki arxitekturanın bütöv zəifliyindən qaynaqlanır [6], [7].

Robototexnika və yerləşdirilmiş intellekt

Robot anlayışı və ML-in funksional rolu

Robot – sensorlar, prosessorlar və aktuatorlarla təchiz olunmuş, mühiti hiss edən, qərar verən və fiziki dünyada hərəkət icra edən sistemdir. Robototexnika tarixində davranış-əsaslı idarəetmə yanaşmalarının, o cümlədən subsumption arxitekturasının mühüm təsiri olmuşdur [7], [8].

Maşın öyrənməsi robotlarda əsasən aşağıdakı funksiyaları gücləndirir:

- Qavrayış: obyektlerin tanınması və mühitin semantik şərhı;
- Planlaşdırma: təcrübədən öyrənərək daha optimal qərarvermə;
- İdarəetmə: geriəlaqə dövrəsində dəqiqliyin artırılması və adaptiv idarəetmə.

Kompüter mühəndisliyi baxımından isə robotların “intellekti” yalnız model keyfiyyəti ilə deyil, həm də kənar hesablama (edge computing) məhdudiyətləri, enerji sərfi, real vaxt gecikmələri, sensor səs-küyü, aktuatorların qeyri-xətti dinamikası və proqram təminatının sertifikatlaşdırılması tələbləri ilə müəyyən edilir [7], [8].

Materialların informatikası və hesablama yönümlü material kəşfi

Materialların axtarışı (kompozisiya–proses–xassə) çoxölçülü və geniş seçim məkanı tələb etdiyinə görə AI/ML üçün əlverişli sahə hesab olunur. Nümunələrin hazırlanması və sınaqların robotlaşdırılması, ölçmələrin avtomatlaşdırılması və ML modellərinin proqnozlaşdırma məqsədilə öyrədilməsi nəticəsində proses tədricən qapalı dövrlü avtonom kəşf modelinə yaxınlaşır [8], [10].

Kompüter mühəndisliyi baxımından bu istiqamət yüksək məhsuldarlıqlı hesablama (HPC), paylanmış hesablama, məlumat boru xətləri (data pipelines), laboratoriya avtomatlaşdırması və eksperiment idarəetməsinin etibarlılığı ilə birbaşa bağlıdır [10].

Etibarlı mühəndislik-AI sistemləri üçün əsas çağırışlar

Müasir ML modelləri yüksək nəticələr versə də, etibarlılıq baxımından domain shift, düşmən təsirlər (adversarial), qərəz və izah edilə bilmə problemləri kimi risklər daşıyır. Bu risklər təhlükəsizlik-kritik sistemlərdə daha kəskin görünür: yüksək düzgünlük səviyyəsinə baxmayaraq nadir hallarda baş verən ciddi səhvlər praktik istismarda qəbuləilməzdir.

Bundan əlavə, böyük modellərin miqyaslanması bahalıdır və “daha çox məlumat + daha çox hesablama” yanaşması çox vaxt azalan gəlir effekti yaradır.

Etimadın formalaşması birdəfəlik deyil, uzunmüddətli və yığılan prosesdir. Buna görə sistem dizaynında yalnız interfeys deyil, həm də istismar konsepsiyası, təlim və istismar protokolları, hadisələrin jurnallaşdırılması və izah/hesabat mexanizmləri nəzərə alınmalıdır.

AI texnologiyalarının iqtisadi miqyasının artması fonunda əmək bazarında yerdəyişmələr, məlumat məxfiliyi, müəllif hüquqları və bərabərlik məsələləri daha aktualdır. Eyni zamanda AI-nin “qara qutu” xarakteri klassik şəffaflıq tələbləri ilə ziddiyyət yaradır və avtonomluq səviyyəsi, məsuliyyət və nəzarət mexanizmləri üzrə tənzimləmə ehtiyacını gücləndirir.

Mühəndislik əsaslı süni intellekt sistemlərinin inkişafı kompüter mühəndisliyinin çoxşaxəli məsələlərini birləşdirir: sensor–hesablama–idarəetmə zəncirinin inteqrasiyası, real vaxt performansı, etibarlılıq, kiberdavamlılıq, verifikasiya/validasiya, insan–sistem interfeysi və tənzimləmə. Avtonom nəqliyyat, robototexnika, istehsal avtomatlaşdırması, tibbi robotlar və material kəşfi kimi sahələrdə real təsir yalnız alqoritmik tərəqqi ilə deyil, möhkəm sistem arxitekturasının və etibarlılıq təminatı mexanizmlərinin düzgün qurulması ilə mümkün olacaqdır.

Ədəbiyyat

- [1]. Brooks, R.A. A robust layered control system for a mobile robot // IEEE Journal of Robotics and Automation, –1986, 2(1), –p.14–23.
- [2]. Brooks, R.A. Intelligence without representation // Artificial Intelligence, –1991, 47(1–3), – p.139–159.

- [3]. DARPA. DARPA Grand Challenge overview. Defense Advanced Research Projects Agency. – 2004
- [4]. DARPA. DARPA Grand Challenge: Results and analysis. Defense Advanced Research Projects Agency. –2005
- [5]. Garibay, O.O. Six human-centered artificial intelligence grand challenges / O.O.Garibay, F.Xu, C.Strickland, [et al.] // International Journal of Human–Computer Interaction, –2023, 39(5), – p.1–16.
- [6]. Goodfellow, I.J., Shlens, J., & Szegedy, C. Explaining and harnessing adversarial examples // International Conference on Learning Representations (ICLR). –2015
- [7]. Halevy, A. The unreasonable effectiveness of data / A.Halevy, P.Norvig, F.Pereira // IEEE Intelligent Systems, –2009, 24(2), –p.8–12.
- [8]. LeCun, Y. Deep learning / Y.LeCun, Y.Bengio, G.Hinton // Nature, – 2015, 521(7553), – p.436–444.
- [9]. National Highway Traffic Safety Administration / Crash data for advanced driver assistance systems. U.S. Department of Transportation. –2023
- [10]. Raissi, M. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems / M.Raissi, P.Perdikaris, G.E.Karniadakis // Journal of Computational Physics, –2019, 378, –p.686–707.

Summary

The role of artificial intelligence in engineering, existing approaches and future directions

Huseynova L.I.

Keywords: *artificial intelligence, autonomous systems, computer science, artificial intelligence engineering, materials and manufacturing technologies, ethics and responsibility.*

This paper provides a systematic analysis of the integration of artificial intelligence and machine learning into engineering systems – such as autonomous vehicles, intelligent control systems, and materials discovery – while also examining existing approaches to ensuring the functional safety and operational reliability of these systems.

Based on the conducted analysis, current scientific achievements and existing challenges are summarized, and key research directions are identified to establish effective and sustainable interaction between engineering sciences and artificial intelligence technologies.

Резюме

Роль искусственного интеллекта в инженерии, существующие подходы и будущие направления

Гусейнова Л.И.

Ключевые слова: *искусственный интеллект, автономные системы, компьютерные науки, инженерия искусственного интеллекта, материалы и производственные технологии, этика и ответственность.*

В представленной статье системно анализируется интеграция искусственного интеллекта и машинного обучения в инженерные системы – такие как автономные транспортные средства, интеллектуальные системы управления и обнаружение новых материалов, – а также рассматриваются существующие подходы к обеспечению функциональной безопасности и эксплуатационной надежности этих систем.

По результатам проведенного анализа обобщаются современные научные достижения и актуальные проблемы, а также определяются основные научные направления, направленные на формирование эффективного и устойчивого взаимодействия между инженерными науками и технологиями искусственного интеллекта.

Mündəricat * Содержание * Contents

Riyaziyyat. Fizika

1. *Allahverdiyeva N.Ə.* Kəsilmə şərtinə malik olan Dirak sisteminin xüsusi həlli haqqında 4
2. *Hətətova R.F.* Öz-özünə qoşma nüvə tipli operator əmsallı ikinci tərtib diferensial operatorların yüksək tərtibli requlyarlaşmış iz düsturları 8
3. *Pзаева В.Г.* Оптимальное управление в системах, описываемых задачаей Гурса для гиперболических интегро-дифференциальных уравнений второго порядка 13

Kimya

4. *Nurullayev V.X., Qurbanov H.R., Qasımzadə A.V., Əliyeva Q.M.* Neftlərin nəqli zamanı xlor üzvi birləşmələrinin təyininə istifadə olunan ölçü vasitələrinin və avadanlıqların düzgün tətbiqinin vacibliyi 21
5. *Mustafayev M.M., Şahgəldiyev F.X., İsmayılova R.İ., Məmmədova A.A., Əhmədov V.N.* Yaşıl kimyanın klassik üzvi reaksiyalardakı mövcud problemlərin həllində rolu və perspektivləri 28
6. *Cavadova S.N.* Kimyəvi kinetikanın fenomenoloji kinetikasının müasir vəziyyəti 38

Biologiya

7. *Bunyatova L.N.* Obtaining active polysaccharides from basidiomycete fungal strains 42
8. *Gasimova G.E.* Development of a model to study *Adams3* gene in myogenic cells 47

Coğrafiya

9. *Alməmmədli M.G.* Viləşçay hövzəsi yamaclarının dərininə parçalanmasının morfometrik tədqiqi 54

Texnika

10. *İlyasov M.X., Nusratzadə M.İ.* UH-60 Black Hawk helikopterinin daşıyıcı vintinin formasının optimallaşdırılması: S0 və S2 konfigurasiyalarının müqayisəli təhlili 60
11. *Mehbalıyeva E.V.* Heterogen serverləri, buferləri və növbədəki müxtəlif tipli sifarişlərin saylarının fərqiindən asılı olan sıçrayışlı prioritetləri (JP) olan xidmət sistemlərinin modelləri 66
12. *Гулиева Н. А.* Архитектура интеллектуальных систем управления процессами дегидрирования углеводов на основе нейросетевых технологий и цифровых двойников 69
13. *Həşimova H.M.* Qarışdırıcı intiqalların elektromexaniki parametrləri əsasında polimerləşmə prosesi gedişinə operativ nəzarət məsələsi 76
14. *Hüseynzadə A.E.* Avtomatlaşdırılmış layihələndirmə sistemlərində layihə həll qəbulunun dəstəklənməsi sisteminin işlənməsinin metodoloji amilləri 83
15. *Əhmədov L.N., Osmanlı T.E.* Virtual mühitdə adaptiv tədris sisteminin yaradılması və intellektual qiymətləndirmə alqoritminin tətbiqi 90
16. *Hüseynova L.İ.* Mühəndislikdə süni intellektin rolu, mövcud yanaşmalar və gələcək istiqamətlər 96

Təsisçi: Sumqayıt Dövlət Universiteti

“Elmi Xəbərlər. Təbiət və texniki elmlər bölməsi” jurnalı Azərbaycan Respublikası Təhsil Nazirinin 27.10.2000-ci il tarixli, 991 sayılı əmrinə əsasən nəşr edilir.

Azərbaycan Respublikası Ədliyyə Nazirliyi tərəfindən qeydiyyatdan alınmışdır.

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının qərarı ilə elmi nəşrlər siyahısına daxil edilmişdir.

Jurnal Rusiya Elmi İstinad İndeksində (REİİ) daxil edilmişdir (müqavilə № 408-10/2019)

https://elibrary.ru/title_about.asp?id=73721

Məqalələrin tərtibatı qaydaları ilə jurnalın rəsmi saytında <https://www.ssu-scientificnews.edu.az/az> tanış olmaq olar.

Учредитель: Сумгаитский государственный университет

Журнал «Научные Известия. Серия: Естественные и технические науки» издается на основании приказа № 991 Министра Образования Азербайджанской Республики от 27.10.2000-го года.

Зарегистрирован Министерством Юстиции Азербайджанской Республики.

Включен в список научных изданий Высшей Аттестационной Комиссии при Президенте Азербайджанской Республики.

Журнал включен в Российский Индекс Научного Цитирования (РИНЦ. Договор № 408-10/2019)

https://elibrary.ru/title_about.asp?id=73721

С правилами оформления статей можно ознакомиться на официальном сайте журнала

<https://www.ssu-scientificnews.edu.az/az>

Founder: Sumgayit State University

The Journal of "Scientific News. Series for Natural and Technical Sciences" is published due to the order № 991 of the Minister of Education of the Republic of Azerbaijan from 27.10.2000.

It has been registered by the Ministry of Justice of the Republic of Azerbaijan.

It has been included to the list of scientific publications of the Supreme Attestation Commission under President of the Republic of Azerbaijan

The journal is included in the Russian Scientific Citation Index (RSCI. Contract № 408-10/2019)

https://elibrary.ru/title_about.asp?id=73721

The rules for the design of articles can be found on the official website of the journal

<https://www.ssu-scientificnews.edu.az/az>

Məsul katib *S.Şahverdiyeva*
Texniki redaktor *E.Həsəratova*

Çapa imzalanmışdır: 16.03.2026-cı il
Mətbəə kağızı, kağızın formatı: 70*108 ¼
Yüksək çap üsulu. Həcmi: 23,18 ş.ç.v.
Sifariş 114. Tiraj 250 nüsxə.
Qiyməti müqavilə yolu ilə.

Sumqayıt Dövlət Universiteti
Redaksiya və nəşr işləri şöbəsi

Müxbir ünvan

Azərbaycan, 5008, Sumqayıt, 43-cü məhəllə
Tel: (0-12) 448-12-74
(0-18) 644-70-41

Web: <https://www.ssu-scientificnews.edu.az>

E-mail: sevda.shaxverdiyeva@sdu.edu.az

