

Регистрационный
№ KZ71VPY00092356

ISSN 1561-4212
ISSN 2789-8210 (Online)
№ 2(108), июнь, 2025

Ғылыми журнал

Д. Серікбаев атындағы
Шығыс Қазақстан
техникалық университетінің

ХАБАРШЫСЫ

ВЕСТНИК

Восточно-Казахстанского
технического университета
им. Д. Серикбаева

Научный журнал

BULLETIN

of D. Serikbayev
East Kazakhstan
technical university

Scientific journal



1999 жылдан бастап шығады
Издается с 1999 года
Founded in 1999



Жылына 4 рет шығады
Выходит 4 раза в год
Published 4 times a year

Өскемен, 2025
Усть-Каменогорск, 2025
Ust-Kamenogorsk, 2025

Бас редакторы

С.Ж. Рахметуллина

техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор

Редакция алқасы:

Бас редактордың орынбасары:

Н.Ф. Денисова, физика-математика ғылымдарының кандидаты,
Жауапты хатшы – О.Н. Николаенко

Алқа мүшелері:

У.Б. Абдикерова, Dr.PhD (Қазақстан)
Абрахам Атта Огву, профессор (Ұлыбритания)
Д.Л. Алонцева, ф.-м.ғ.к., профессор (Қазақстан)
Бешо Масахико, Dr.PhD, профессор (Жапония)
И.А. Бессмертный, т.ғ.д., профессор (Ресей)
Вальдемар Войчик, т.ғ.д. (Польша)
С.А. Выжва, г.ғ.д., профессор (Украина)
М.В. Дудкин, т.ғ.д., профессор (Қазақстан)
Н.К. Ердыбаева, ф.-м.ғ.д. (Қазақстан)
В.А. Кескинов, т.ғ.к., доцент (Ресей)
Ю.В. Крак, т.ғ.д., профессор (Украина)
О.Н. Кузмина, Dr.PhD, қауымдастырылған профессор (Қазақстан)
Н.А. Куленова, т.ғ.к., профессор (Қазақстан)
В.И. Логанина, т.ғ.д., профессор (Ресей)
С.В. Мамяченков, т.ғ.д., профессор (Ресей)
Игнасио Менендес Пидаль де Наваскес, профессор (Испания)
М. Млынчак, Dr. hab, профессор (Польша)
А.Д. Погребняк, ф.-м.ғ.д., профессор (Украина)
Н.В. Прохоренкова, Dr.PhD (Қазақстан)
М.Д. Старостенков, ф.-м.ғ.д., (Ресей)
Я. Стрычек, Dr. hab, профессор (Польша)
А.С. Тулебекова (Қазақстан)
С.В. Хромых, г.-м.ғ.д. (Ресей)
Н.А. Чарыков, х.ғ.д., профессор (Ресей)
Ю.Н. Шапошник, т.ғ.д., профессор (Ресей)

© Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан
техникалық университеті, 2025

Главный редактор

С.Ж. Рахметуллина

кандидат технических наук, ассоциированный профессор

Редакционная коллегия:

Заместитель главного редактора:

Н.Ф. Денисова, кандидат физико-математических наук,
Ответственный секретарь – О.Н. Николаенко

Члены коллегии:

У.Б. Абдикерова, Dr.PhD (Казахстан)
Абрахам Атта Огву, профессор (Великобритания)
Д.Л. Алонцева, к.ф-м н., профессор (Казахстан)
Бешо Масахико, Dr.PhD, профессор (Япония)
И.А. Бессмертный, д.т.н., профессор (Россия)
Вальдемар Войчик, д.т.н. (Польша)
С.А. Выжва, д.г.н., профессор (Украина)
М.В. Дудкин, д.т.н., профессор (Казахстан)
Н.К. Ердыбаева, д.ф-м.н. (Казахстан)
В.А. Кескинов, к.т.н., доцент (Россия)
Ю.В. Крак, д.т.н., профессор (Украина)
О.Н. Кузьмина, доктор PhD, асс. профессор (Казахстан)
Н.А. Куленова, к.т.н., профессор (Казахстан)
В.И. Логанина, д.т.н., профессор (Россия)
С.В. Мамяченков, д.т.н., профессор (Россия)
Игнасио Менендес Пидаль де Наваскес, профессор (Испания)
М. Млынчак, Dr. hab, профессор (Польша)
А.Д. Погребняк, д.ф.м.н., профессор (Украина)
Н.В. Прохоренкова, Dr.PhD (Казахстан)
М.Д. Старостенков, д.ф-м.н., (Россия)
Я. Стрычек, Dr. hab, профессор (Польша)
А.С. Тулебекова (Казахстан)
С.В. Хромых, д.г.-м.н. (Россия)
Н.А. Чарыков, д.х.н., профессор (Россия)
Ю.Н. Шапошник, д.т.н., профессор (Россия)

© Восточно-Казахстанский технический
университет им. Д. Серикбаева, 2025

Chief Editor

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor –
S. Rakhmetullina

Editorial Team:

Deputy Chief Editor

Natalya Denissova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Executive Secretary – Oksana Nikolaenko

Members of Team:

Uliya Abdikerova, Dr. PhD (Kazakhstan)
Abraham Atta Ogwu, professor (Great Britain)
Darya Alontseva, Candidate of Phys.-math. sciences, professor (Kazakhstan)
Masahiko Bessho, Dr.PhD, professor (Japan)
Igor Bessmertnyy, Dr. techn. sciences, professor (Russia)
Waldemar Wojcik, Dr. techn. sciences, professor (Poland)
Sergey Vyzhva, Geophysics Dr. geolog. sciences, professor (Ukraine)
Mikhail Dudkin, Dr. techn. sciences, Professor (Kazakhstan)
Nazgul Yerdybayeva, Dr. phys.-math. sciences, professor (Kazakhstan)
Viktor Keskinov, PhD in Chemistry sciences (Russia)
Yuri Krak, Dr. techn. sciences, Professor (Ukraine)
Oxana Kuzmina, Dr.PhD, Assistant professor (Kazakhstan)
Natalya Kulenova, Cand. techn. sciences, Professor (Kazakhstan)
Valentina Loganina, Dr. techn. sciences, Professor (Russia)
Sergey Myamyachenkov, Dr. techn. sciences (Russia)
Ignacio Menéndez-Pidal de Navascués, Professor (Spain)
Marek Mlyncek, Dr. hab, professor (Poland)
Aleksandr Pogrebnyak, Dr. phys.-math. sciences, professor (Ukraine)
Nadezhda Prokhorenkova, Dr.PhD (Kazakhstan)
Mikhail Starostenkov, Dr. phys.-math. sciences, professor (Russia)
Jaroslaw Strycek, Dr. hab, professor (Poland)
Assel Tulebekova (Kazakhstan)
Sergey Khromykh, Dr. geolog.-mineral. sciences (Russia)
Nikolay Charykov, Dr. of Chemistry (Russia)
Yuri Shaposhnik, Dr. techn. sciences, professor (Russia)



ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО
ENGINEERING AND ENGINEERING

ДЕФОРМАЦИЯЛАНАТЫН ҚАТТЫ ДЕНЕНІҢ МЕХАНИКАСЫ
МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА
MECHANICS OF DEFORMABLE SOLID BODY

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_5
IRSTI 30.19.15

B.M. Abdeyev¹, S.R. Baigereyev², T.F. Brim³

NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

¹E-mail: m.abdeeva@mail.ru

²E-mail: samat.baigereyev@mail.ru

³E-mail: tbrim@mail.ru*

**A NEW TYPE OF BODY FORCE IN THE MECHANICS
OF ELASTICALLY DEFORMABLE SOLIDS**

**СЕРПІМДІ ДЕФОРМАЦИЯЛАНАТЫН ҚАТТЫ ДЕНЕЛЕР МЕХАНИКАСЫНДАҒЫ
ДЕНЕ КҮШІНІҢ ЖАҢА ТҮРІ**

**НОВЫЙ ВИД ОБЪЁМНОЙ СИЛЫ В МЕХАНИКЕ УПРУГОДЕФОРМИРУЕМОГО
ТВЕРДОГО ТЕЛА**

Abstract. Based on the analysis and comparison of atomic physical and engineering models of solid matter, the existing classification of volumetric forces used in the resistance of materials and the theory of elasticity is expanded (magnetic, electromagnetic, inertial, gravitational). This fundamentally new addition is justified by replacing the force of interatomic interaction with a statistically averaged analogous equivalent in the form of a quasi-elastic volumetric load acting between infinitesimal material particles of a solid body which are displaced during its deformation. For continuous homogeneous isotropic materials obeying Hooke's law, using the fundamental law of conservation of mechanical energy, a general theory has been developed for determining the quasi-elastic body force function, the three projections of which X_k, Y_k, Z_k on the coordinate axes x, y, z linearly depend on the corresponding displacements u, v, w in x, y, z direction. The proposed calculation method is illustrated by the simplest example from the classical course of resistance of materials to uniaxial tension by external static forces P of a linearly elastic weightless beam of constant cross-section. In the course of a mathematically accurate solution to this innovative problem: 1) it was proven that the new quasi-elastic mass force depends on the location (coordinates) of an arbitrary point of the body, the external load acting on the structure, its volume and Poisson's ratio μ , and at $\mu = 0,5$ this volumetric load becomes zero; 2) the relevance and great importance of taking into account the quasi-elastic volumetric force in the equilibrium equations in the process of mathematical modeling of the stress-strain state and design of load-bearing structures has been confirmed.

This approach opens up new opportunities for a more accurate assessment of the strength, rigidity, and stability of machine-building structural elements, including machine parts and mechanisms, automotive structural components, as well as aerospace and railway structures

Keywords: force, stress, deformation, displacement, homogeneity, isotropy, quasi-elasticity, surface and volume loads.

Аңдатпа. Қатты заттардың атомдық физикалық және инженерлік модельдерін талдау және салыстыру негізінде материалдардың кедергісінде қолданылатын көлемдік күштердің қолданыстағы классификациясы және серпімділік теориясы кеңейтілді: магниттік, электромагниттік, инерциялық, гравитациялық. Бұл түбегейлі жаңа қосу атомаралық әрекеттесу күшін оның деформациясы кезінде ығысатын қатты дененің шексіз аз материалдық бөлшектері арасында әрекет ететін квазисерпімді көлемдік жүктеме түріндегі статистикалық орташаланған ана-

логтық эквивалентпен алмастыру арқылы негізделеді. Гук заңына бағынатын үздіксіз біртекті изотропты материалдар үшін механикалық энергияның сақталу заңын қолдана отырып, дененің квазисерпімді күші функциясын анықтаудың жалпы теориясы жасалды, олардың үш проекциясы X_k , Y_k , Z_k координаталық осьтер бойынша x , y , z сәйкес орын ауыстыруларға сызықтық тәуелді u , v , w бағытта x , y , z . Ұсынылған есептеу әдісі тұрақты көлденең қимадағы сызықты серпімді салмақсыз арқалықтың P сыртқы статикалық күштерімен бір осьті керілуге материалдардың кедергісінің классикалық курсынан қарапайым мысалмен суреттелген. Осы инновациялық есептің математикалық нақты шешімі барысында: 1) жаңа квазисерпімді массалық күш дененің еркін нүктесінің орналасуына (координатасына), құрылымға әсер ететін сыртқы жүктемеге, оның көлеміне және Пуассон қатынасына тәуелді екендігі дәлелденді μ , және қашан $\mu = 0,5$ бұл көлемдік жүктеме нөлге айналады; 2) кернеулі-деформациялық күйді математикалық модельдеу және жүк көтергіш құрылымдарды жобалау процесінде тепе-теңдік теңдеулерінде квазисерпімді көлемдік күшті есепке алудың өзектілігі мен үлкен маңыздылығы расталды.

Бұл тәсіл машиналар мен механизмдердің бөліктерін, автомобильдердің құрылымдық элементтерін, сондай-ақ ұшақтар мен темір жол жабдықтарының құрылымдарын қоса алғанда, машина жасау құрылымдарының элементтерінің беріктігін, қаттылығын және орнықтылығын неғұрлым дәл бағалау үшін жаңа мүмкіндіктер ашады.

Түйін сөздер: күш, кернеу, деформация, қозғалу, біркелкілігі, изотропия, квази серпімділік, беттік және көлемдік жүктемелер.

Аннотация. Базируясь на анализе и сравнении атомарной физической и инженерно-технической моделей твердого вещества, расширена существующая классификация объемных сил, используемая в сопротивлении материалов и теории упругости: магнитных, электромагнитных, инерционных, гравитационных. Это принципиально новое дополнение обосновано заменой силы межатомного взаимодействия статистическим осредненным аналогичным эквивалентом в виде квазиупругой объемной нагрузки, действующей между бесконечно малыми материальными частицами твердого тела, которые смещаются при его деформации. Для сплошных однородных изотропных материалов, подчиняющихся закону Гука, с применением фундаментального закона сохранения механической энергии разработана общая теория определения функции квазиупругой объемной силы, три проекции которой X_k , Y_k , Z_k на координатные оси x , y , z линейно зависят от соответствующих перемещений u , v , w в направлении x , y , z . Предложенная методика расчета проиллюстрирована простейшим примером из классического курса сопротивления материалов на одноосное растяжение внешними статическими силами P линейно упругого невесомого бруса постоянного поперечного сечения. В ходе математически точного решения этой инновационной задачи: 1) доказано, что новая квазиупругая массовая сила зависит от места расположения (координат) произвольной точки тела, внешней нагрузки, действующей на конструкцию, её объема и коэффициента Пуассона μ , а при $\mu = 0,5$ данная объемная нагрузка становится равной нулю; 2) подтверждена актуальность и большая значимость учета в уравнениях равновесия квазиупругой объемной силы в процессе математического моделирования напряженно-деформированного состояния и проектирования несущих конструкций.

Данный подход открывает новые возможности для более точной оценки прочности, жесткости и устойчивости элементов машиностроительных конструкций, включая детали машин и механизмов, конструктивные элементы автомобилей, а также конструкции авиационной и железнодорожной техники.

Ключевые слова: сила, напряжение, деформация, перемещение, однородность, изотропность, квазиупругость, поверхностная и объемная нагрузки.

Solid matter, in accordance with the idealized fundamental physical model, consists of interconnected and regularly located cubic cells, in the corners of which there are atoms at equal distances until the body deforms [Pavlov, Hohlov, et al., 2000; Gurevich, et al., 2004; Ashcroft, Cornell, et al., 2003; Patterson, et al., 2019; Hasbun, Datta, et al., 2019; Oma, et al., 1993]. In the elastic region, each atom is slightly displaced by a small amount in the direction opposite to the action of the restoring (quasi-elastic) point load (Figure 1)

$$F_K = -k \cdot x \quad (1)$$

with a proportionality coefficient, which is called the quasi-elastic force coefficient [Pavlov, Hohlov, et al., 2000; Gurevich, et al., 2004; Ashcroft, Cornell, et al., 2003; Patterson, et al.,

2019; Hasbun, Datta, et al., 2019; Oma, et al., 1993; YAvorskij, Detlaf, et al., 1981; YAvorskij, Detlaf, et al., 1979].

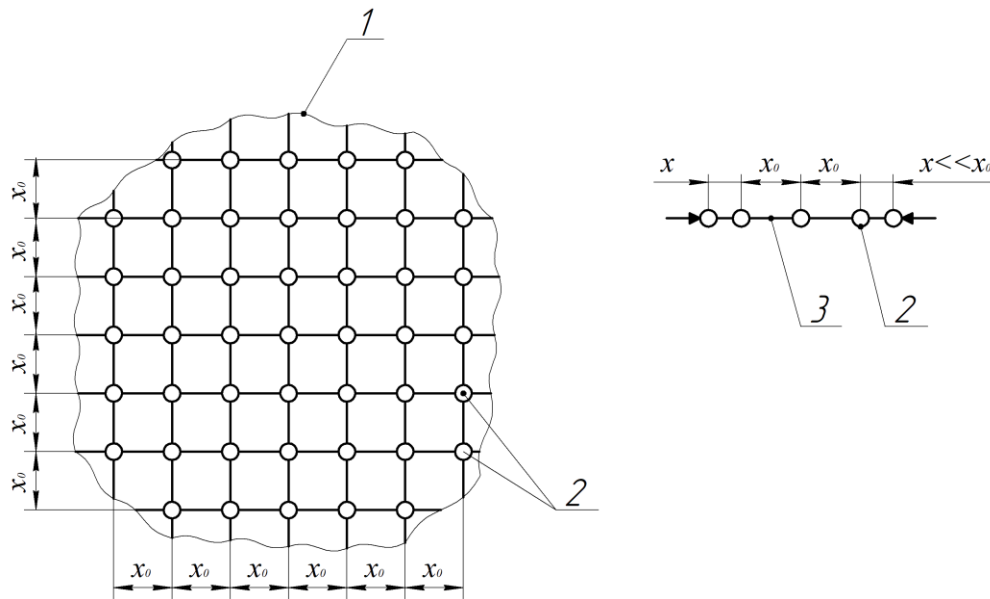


Figure 1. Interpretation on a plane of the ideal atomic structure of a solid from a physical point of view without taking into account imperfections (vacancies, interstitials, cracks, etc.): 1 – undeformed solid (material); 2 – atoms; 3 – diagram of the displacement of atoms during deformation of the body and the occurrence of restorative (quasi-elastic) $F_k = -k \cdot x$

Note – compiled by the authors

In engineering and technical modeling of the stress-strain state of a real load-bearing structure and its parts, used in applied mechanics of a deformable solid medium [Filin, et al., 1975; Timoshenko, Gere, et al., 1976], including the strength of materials [Ickovich, et al., 2001; Feodos'ev, et al., 2001; Vardanyan, Andreev, Atarov, Gorshkov et al., 1995] and the theory of elasticity [Struzhanov, Burnasheva, et al., 2019; Han, et al., 1988; Kac, et al., 2002; Skripnyak, Zhukova, Skripnyak, et al., 2005; Timoshenko, et al., 1975; Lur'e, et al., 1970; Sapunov, et al., 2011; Gorshkov, Starovojtov, Tarlakovskij, et al., 2002; Sapunov, et al., 2008; Dudyak, Sahnovich, et al., 2010], a homogeneous continuous isotropic solid substance (material) is represented in a rectangular frame of reference by an infinite number of material points having an elementary volume

$$dV = dx \cdot dy \cdot dz. \quad (2)$$

Each point $B(x, y, z)$ in the case of deformation of the body moves by a certain amount

$$BB_1 = BB_1(x, y, z) \quad (3)$$

with corresponding projections

$$u = u(x, y, z), \quad v = v(x, y, z), \quad w = w(x, y, z) \quad (4)$$

to coordinate axes (x, y, z) [Filin, et al., 1975; Ickovich, et al., 2001; Feodos'ev, et al., 2001; Vardanyan, Andreev, Atarov, Gorshkov et al., 1995; Struzhanov, Burnasheva, et al., 2019; Han, et al., 1988; Kac, et al., 2002; Skripnyak, Zhukova, Skripnyak, et al., 2005; Timoshenko, et al., 1975; Lur'e, et al., 1970; Sapunov, et al., 2011; Gorshkov, Starovojtov, Tarlakovskij, et al.,

2002; Sapunov, et al., 2008; Dudyak, Sahnovich, et al., 2010] (Figure 2). Kinematic parameters $u, v, w > 0$ if their directions coincide with $x, y, z > 0$, as in Figure 2.

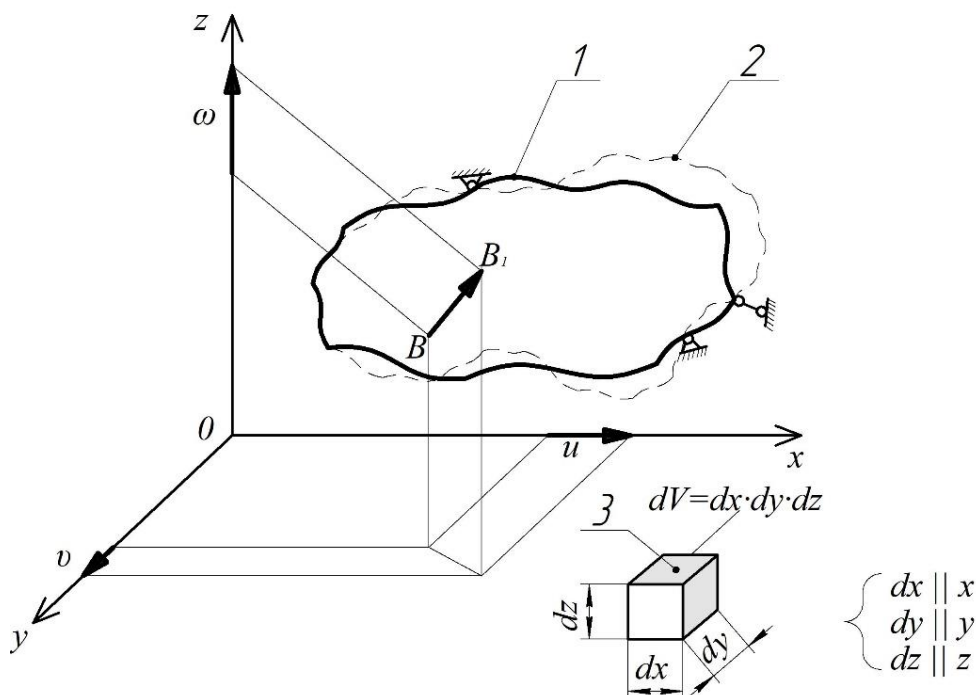


Figure 2. Scheme of elastic displacement of a material point $B(x, y, z)$ by the amount BB_1 : 1 – rigid body fixed to deformation; 2 – elastically deformed state of the body; 3 – elementary parallelepiped in the vicinity of any arbitrary point of the elastic medium

Note – compiled by the authors

Comparing the atomic model of a solid (Figure 1) with the engineering model (Figure 2), one can note their obvious physical and mechanical analogy. In the first case (Figure 1), due to elastic deformation of the body, atoms are displaced under the influence of external ones, and in the second (Figure 2) material points move. On this basis, it is permissible, according to (1), to introduce into the equations of equilibrium (statics) and motion (dynamics) of an elastically deformable solid body, as projections on the axis $x, y, z > 0$, additional volumetric quasi-elastic or restoring loads

$$X_k = X_{K(x,y,z)} = -k \cdot u, \quad Y_k = Y_{K(x,y,z)} = -k \cdot v, \quad Z_k = Z_{K(x,y,z)} = -k \cdot w, \quad (5)$$

in addition to the already known components X, Y, Z [Filin, et al., Timoshenko, Gere, et al., 1976; Ickovich, et al., 2001; Feodos'ev, et al., 2001; Vardanyan, Andreev, Atarov, Gorshkov et al., 1995]. Naturally, the coefficient in linear relations (5) must have the dimension $P \cdot L^{-4}$ (P – force, L – length).

We also argue for the implementation of the addition procedure (5) by the impossibility of determining the force (1) of interaction between each pair of atoms (Figure 1) and, in connection with this, the need to replace the volumetric quasi-elastic loads (5) arising between infinitesimal material particles of solid matter with an averaged statistical equivalent (Figure 2).

As for the numerical determination of the parameter in force projections (5) and its mechanical and mathematical content, then, at least for physically linear, homogeneous,

isotropic, solid materials, this problem in the static formulation, as will be shown below, is easily solved analytically by energy method.

It is known [Pavlov, Hohlov, et al., 2000; Gurevich, et al., 2004; Ashcroft, Cornell, et al., 2003; Patterson, et al., 2019; Hasbun, Datta, et al., 2019; Oma, et al., 1993; YAvorskij, Detlaf, et al., 1981; YAvorskij, Detlaf, et al., 1979; Filin, et al., 1975; Timoshenko, Gere, et al., 1976; Struzhanov, Burnasheva, et al., 2019; Han, et al., 1988; Kac, et al., 2002; Skripnyak, ZHukova, Skripnyak, et al., 2005; Timoshenko, et al., 1975; Lur'e, et al., 1970; Sapunov, et al., 2011; Gorshkov, Starovojtov, Tarlakovskij, et al., 2002; Sapunov, et al., 2008; Dudyak, Sahnovich, et al., 2010; Voronkov, et al., 1961; Belyaev, et al., 1965; Strelkov, et al., 1975]. that at stresses not exceeding the elastic limit, the change in the thermal and electromagnetic state is insignificant and can be neglected. As a result, all the work A of external forces, based on the law of conservation of mechanical energy [Filin, et al., 1975; Feodos'ev, et al., 2001; Voronkov, et al., 1961; Belyaev, et al., 1965; Strelkov, et al., 1975], accumulates in the body material in the form of the sum of potential U and kinetic K energies of deformation, that is

$$U + K = A, \quad (6)$$

where in the case of a static stress-strain state of the structure

$$K = 0. \quad (7)$$

When determining A , we take into account [Filin, et al., 1975; Timoshenko, Gere, et al., 1976; Ickovich, et al., 2001; Feodos'ev, et al., 2001; Vardanyan, Andreev, Atarov, Gorshkov et al., 1995; Struzhanov, Burnasheva, et al., 2019; Han, et al., 1988; Kac, et al., 2002; Skripnyak, ZHukova, Skripnyak, et al., 2005; Timoshenko, et al., 1975; Lur'e, et al., 1970; Sapunov, et al., 2011; Gorshkov, Starovojtov, Tarlakovskij, et al., 2002; Sapunov, et al., 2008; Dudyak, Sahnovich, et al., 2010; Belyaev, et al., 1965], both volumetric $X + X_k$, $Y + Y_k$, $Z + Z_k$ and surface loads X_γ , Y_γ , Z_γ , and express the energy component of equality (6) through the principal normal stresses

$$\sigma_1 = \sigma_1(x, y, z), \sigma_2 = \sigma_2(x, y, z), \sigma_3 = \sigma_3(x, y, z), \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3, \quad (8)$$

acting along three mutually perpendicular elementary areas in the vicinity of an arbitrary point B (Figure 2) [Filin, et al., 1975; Ickovich, et al., 2001; Feodos'ev, et al., 2001; Belyaev, et al., 1965]:

$$U = U_0 + U_f = \frac{1-2\mu}{6E} \int_V (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 dV + \frac{1+\mu}{3E} \int_V (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1) dV = \frac{1}{2E} \int_V [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] dV; \quad (9)$$

where U_0 , U_f , – potential energies of change in volume (0) and shape (f) of the body (parts, structures)

$$U_0 = \frac{1-2\mu}{6E} \int_V (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \cdot dV, \quad (10)$$

$$U_f = \frac{1+\mu}{3E} \int_V (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1) dV; \quad (11)$$

E, μ – respectively, the elastic modulus and Poisson's ratio of the material.

Let us approximate the right side of the energy balance (6) by the sum of two components

$$A = A_p + A_k, \quad (12)$$

under conditions (5), (7) and compliance with Hooke's law, in which [Filin, et al., 1975; Timoshenko, Gere, et al., 1976; Struzhanov, Burnasheva, et al., 2019; Han, et al., 1988; Kac, et al., 2002; Timoshenko, et al., 1975]: A_p – work of external surface $X_\gamma, Y_\gamma, Z_\gamma$ and volumetric X, Y, Z loads, with the exception of (5) and inertial force factors (static problem),

$$A_p = \frac{1}{2} \left[\int_V (X \cdot u + Y \cdot v + Z \cdot w) dV + \int_S (X_\gamma \cdot u + Y_\gamma \cdot v + Z_\gamma \cdot w) dS \right], \quad (13)$$

$A_k \leq 0$ – total work from projections (5) on the axis of quasi-elastic mass forces X_K, Y_K, Z_K

$$A_p = \frac{1}{2} \left[\int_V (X \cdot u + Y \cdot v + Z \cdot w) dV + \int_S (X_\gamma \cdot u + Y_\gamma \cdot v + Z_\gamma \cdot w) dS \right], \quad (14)$$

V – volume (V) and area (S) of the body (structure).

Taking into account (7), (9)-(12), we present the law of energy constancy (6), when $K = 0$:

$$U_0 + U_f = -A + A_p + A + A_k = -A_k + 2A_k + A_p, \quad \begin{cases} -A + A_p = -A_k \\ A + A_k = 2A_k + A_p. \end{cases} \quad (15)$$

Using a specific example, taking into account (10), (11), (13), (14) (see below) two combination options U_0, U_f, A_k, A_p ,

$$1) \begin{cases} U_0 = -A_k, \\ U_f = 2A_k + A_p \end{cases} \quad (16)$$

$$(17)$$

$$2) \begin{cases} U_0 = 2A_k + A_p, \\ U_f = -A_k \end{cases} \quad (18)$$

$$(19)$$

a rigorous proof has been found that only if conditions (16), (17) are used, the required and physically and mathematically justified result is obtained when determining the coefficient $k \geq 0$ quasi-elastic body forces (5).

As a typical simple example from the classical course on strength of materials [Timoshenko, Gere, et al., 1976; Ickovich, et al., 2001; Feodos'ev, et al., 2001; Vardanyan, Andreev, Atarov, Gorshkov et al., 1995; Belyaev, et al., 1965], confirming the need and relevance of taking into account X_k, Y_k, Z_k , let us consider uniaxial tension by external static forces a linearly elastic weightless beam constant along its length cross section (Figure 3).

The diagrams in Figure 3 show a typical solution for the resistance of materials for stresses [Filin, et al., 1975; Timoshenko, Gere, et al., 1976; Ickovich, et al., 2001; Feodos'ev, et al., 2001; Vardanyan, Andreev, Atarov, Gorshkov et al., 1995; Belyaev, et al., 1965]

$$\sigma_s = \frac{P}{F} = \text{const}, \Rightarrow \sigma_s^* = \sigma_s \cdot \frac{F}{P} = 1 \quad (20)$$

marked with the index “s”, and the «asterisk» icon indicates the corresponding dimensionless parameter $\sigma_s^* = 1$. The formula for absolute linear deformation u_s looks like a simple linear function

$$u_s = u_s^{(x)} = \frac{P \cdot x}{EF}, \Rightarrow u_s^* = u_s \cdot \frac{EF}{Pl} = \frac{x}{l}, -l \leq x \leq l. \quad (21)$$

For a shaded infinite small beam element with volume (Figure 3)

$$dV = F \cdot dx \quad (22)$$

condition of static equilibrium in the form of the sum of projections of all forces onto the axis x ,

$$\sum x = 0, \quad (23)$$

at $X = Y = Z = Y_k = Z_k = 0$, taking into account (5) and (22), has the form:

$$-\sigma \cdot F + (\sigma + d\sigma) \cdot F + X_k dV = -\sigma F + (\sigma + d\sigma) \cdot F - k \cdot u \cdot F \cdot dx = 0, \Rightarrow \quad (24)$$

$$\frac{d\sigma}{dx} - k \cdot u = 0. \quad (25)$$

Let's imagine the relative linear deformation ε in Hooke's law

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{du}{dx} \quad (26)$$

differential geometric Cauchy dependence [Filin, et al., 1975; Timoshenko, Gere, et al., 1976; Vardanyan, Andreev, Atarov, Gorshkov et al., 1995; Struzhanov, Burnasheva, et al., 2019; Han, et al., 1988; Kac, et al., 2002; Skripnyak, ZHukova, Skripnyak, et al., 2005; Timoshenko, et al., 1975; Lur'e, et al., 1970; Sapunov, et al., 2011; Gorshkov, Starovojtov, Tarlakovskij, et al., 2002; Sapunov, et al., 2008; Dudyak, Sahnovich, et al., 2010]

$$\varepsilon = \frac{du}{dx}. \quad (27)$$

Substituting (26) into (25), we will have a homogeneous linear differential equation of the second order [Bronshtejn, Semendyaev, et al., 1986; Kamke, et al., 1976]

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \beta^2 \cdot u = 0 \quad (28)$$

with a constant coefficient

$$\beta^2 = \frac{k}{E}. \quad (29)$$

In the hyperbolic functions of sine $sh\beta x$ and cosine $ch\beta x$ general solution [Kamke, et al., 1976]

$$u = u(x) = C_1 sh\beta x + C_2 \cdot ch\beta x \quad (30)$$

equation (28) contains two arbitrary integration constants C_1 and C_2 , which we find from the boundary conditions (Figure 3):

– for a fixed point O , due to the symmetry of the calculation model, where $x = 0$,

$$u(0) = 0, \Rightarrow C_2 = 0; \quad (31)$$

in extreme cross sections $x = \pm l$, using (20), (26), (30), (31),

$$\sigma = \sigma(x) = E \frac{du}{dx} = E \cdot C_1 \cdot \beta \cdot ch\beta x, \Rightarrow \quad (32)$$

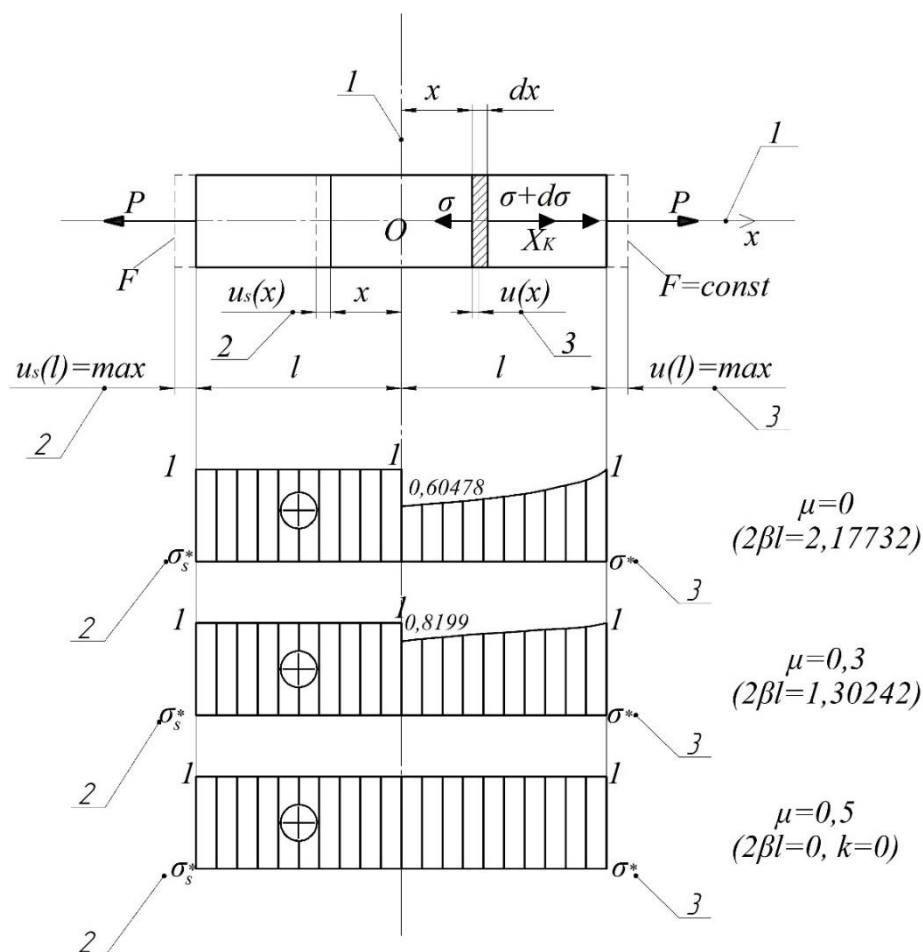


Figure 3. Refined force X_k calculation diagram of the rod and dimensionless epiures of normal stresses: 1 – axis of symmetry; 2 – elementary solution according to the formulas for the strength of materials (20), (21); 3 – new solution of the problem obtained in accordance with (34) – (36) taking into account the quasi-elastic volumetric load

Note – compiled by the authors

$$\sigma(\pm l) = EC_1 \cdot \beta \cdot \operatorname{ch} \beta l = \frac{P}{F}, \Rightarrow C_1 = \frac{Pl}{EF \cdot \beta l \cdot \operatorname{ch} \beta l} \quad (33)$$

Taking into account (31), (33), we obtain from (30), (32) two final formulas:

$$\begin{cases} u = u(x) = \frac{Pl}{EF \cdot \beta l} \cdot \frac{\operatorname{sh} \beta x}{\operatorname{ch} \beta l}; \end{cases} \quad (34)$$

$$\begin{cases} \sigma = \sigma(x) = \frac{P}{F} \cdot \frac{\operatorname{ch} \beta x}{\operatorname{ch} \beta l}, -l \leq x \leq l. \end{cases} \quad (35)$$

It is quite obvious that at $\beta = 0 (\Rightarrow k = 0)$, according to (29), the derived analytical relations (34), (35) are transformed into simplified elementary dependencies (20), (21). Naturally, the same result of transforming (34), (35) into (20), (21) will be obtained directly from the differential equation (28) and Hooke's law (26), when $\beta = 0$.

The dimensionless form of the refined solution (35) for normal stress σ is represented as follows (Figure 3):

$$\sigma^* = \sigma^*(x) = \sigma \frac{F}{P} = \frac{ch\beta x}{ch\beta l}, \quad -l \leq x \leq l. \quad (36)$$

From the final formulas (20), (21) and (34), (35) it follows that, in contrast to the u_s , σ_s , obtained new characteristics u , σ , the stress-strain state of the rod has a pronounced nonlinear nature due to taking into account the volumetric quasi-elastic force $X_k = -k \cdot u$.

Continuing to solve the specific problem posed (Figure 3), we determine the potential energies U, U_0, U_f and work A, A_p, A_f for the right half of the beam, due to the symmetry of its design scheme. For this purpose, we will use general formulas (5), (9) - (11), (12) - (14), (29), (34), (35) and Table integrals [Smolyanskij, et al., 1965]

$$\left. \begin{aligned} \int ch^2 \beta x dx &= \frac{sh2\beta x}{4\beta} + \frac{x}{2}, \\ \int sh^2 \beta x dx &= \frac{sh2\beta x}{4\beta} - \frac{x}{2}, \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

taking in this particular case: $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$; $X = Y = Z = 0$; $Y_\gamma = Z_\gamma = 0$; $u = w = 0 \Rightarrow Y_k = Z_k = 0$ (see (5)); $dV = F \cdot dx$;

$$A_p = \int_s X_\gamma \cdot u \cdot ds = \frac{P \cdot u(l)}{2}. \quad (38)$$

As a result, we get $F = const$:

$$U = \frac{F}{2E} \int_0^l \sigma^2 dx = \frac{P^2 l}{4EF \cdot ch^2 \beta l} \cdot \left(1 + \frac{sh2\beta l}{2\beta l} \right) \geq 0, \quad (39)$$

$$U_0 = \frac{(1-2\mu) \cdot F}{6E} \int_0^l \sigma^2 \cdot dx = \frac{1-2\mu}{3} \cdot U \geq 0, \quad (40)$$

$$U_f = \frac{(1+\mu) \cdot F}{3E} \int_0^l \sigma^2 \cdot dx = \frac{2 \cdot (1+\mu)}{3} \cdot U \geq 0; \quad (41)$$

$$A_p = \frac{P \cdot u(l)}{2} = \frac{P^2 l}{2EF \cdot \beta l} \cdot \frac{sh\beta l}{ch\beta l} = \frac{P^2 l \cdot sh2\beta l}{2EF \cdot 2\beta l \cdot ch^2 \beta l} \geq 0, \quad (42)$$

$$A_k = -\frac{k \cdot F}{2} \int_0^l u^2 \cdot dx = -\frac{\beta^2 EF}{2} \int_0^l u^2 \cdot dx = \frac{P^2 l}{4EF \cdot ch^2 \beta l} \cdot \left(1 - \frac{sh2\beta l}{2\beta l} \right) \leq 0, \quad (43)$$

$$A = A_k + A_p = \frac{P^2 l}{4EF \cdot ch^2 \beta l} \cdot \left(1 + \frac{sh2\beta l}{2\beta l} \right) = U. \quad (44)$$

Using expressions (40) - (43), we check the energy balances (16), (17) and (18), (19) in order to determine the non-zero value of the dimensionless parameter $2\beta l$, and therefore, according to (29), and coefficient $k \geq 0$ volumetric load X_k .

As a result of implementing this procedure:

1) from conditions (16), (17) one transcendental equation is derived [Bronshtejn, Semendyaev, et al., 1986]

$$\operatorname{sh} 2\beta l = \frac{2-\mu}{1+\mu} \cdot 2\beta l, \quad (45)$$

the desired solution of which $0 \leq 2\beta l \leq 2,17732 = \max$ was carried out by the selection method for six values of the coefficient μ , covering the entire permissible range $0 \leq \mu \leq 0,5$, and is presented in Figure 4 by a graph of the dependence $2\beta l = 2\beta l(\mu)$, constructed from the numerical data of Table 1.

2) the disclosure of equalities (18), (19) leads, accordingly, to two similar, but not identical transcendental relations

$$\begin{cases} \operatorname{sh} 2\beta l = \frac{5+2\mu}{1-2\mu} 2\beta l, \\ \operatorname{sh} 2\beta l = 2\beta l, \end{cases} \quad (46)$$

$$(47)$$

the simultaneous (joint) existence of which is possible only in the case $2\beta l = 0 (\Rightarrow k = 0)$.

Table 1. Calculation information for solving equations (45)

μ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$2\beta l$	2,17732	1,90802	1,62212	1,30242	0,907	0
Note – compiled by the authors						

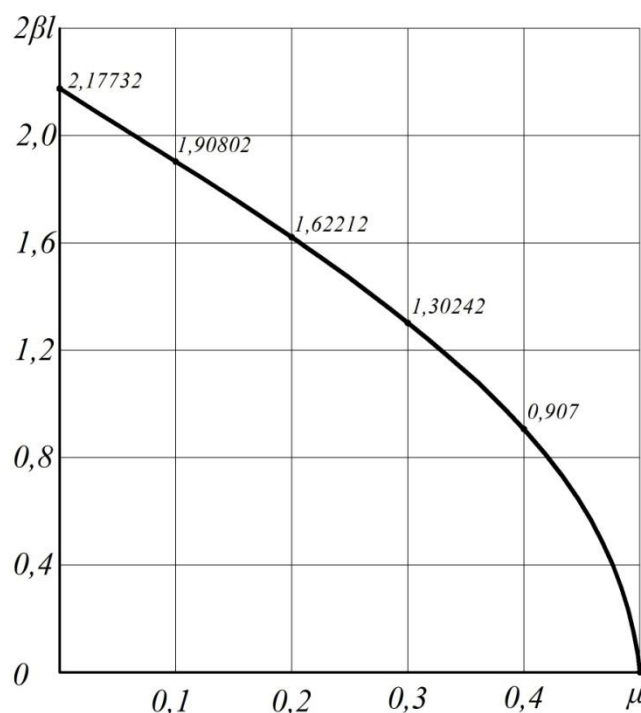


Figure 4. Graphical representation of functions for solving equations (45)

Note – compiled by the authors

Analyzing the results of the calculation $2\beta l \geq 0$, it can be argued that from a mechanical and mathematical point of view, there are only two joint energy combinations (16) and (17), proving the existence of quasi-elastic volumetric forces (5).

Moreover, for such soft materials as resin and rubber, which have $\mu \approx 0,5$ - [Belyaev, et al., 1965; Lavendel, et al., 1976; Anur'ev, et al., 2006], the volumetric load X_k is practically absent, and with Poisson's ratio $\mu = 0$ for cork (natural material) [Belyaev, et al., 1965] value $2\beta l = 2,17732 = \max$, from which it follows $X_k = \max$, $k = \max$, (see (5) and (29)).

Complementing this analysis, it should be noted that if $\mu = 0,5$, then a change in the volume of the body and its potential energy U_0 , according to (10), (40), does not occur, which is possible and actually confirmed only for practically incompressible liquid substances, located in tanks under excess pressure [YAvorskij, Detlaf, et al., 1981; YAvorskij, Detlaf, et al., 1979].

The calculation of the dimensionless stress diagrams $\sigma^* = \sigma^*(x)$ shown in Figure 3 was carried out using formula (36) and quantitative information presented in tabular form (see Tables 1 and 2).

It is of considerable interest to compare extreme values $\sigma_{\min}^* = \sigma^*(0)$, $\sigma_s^* = 1$, and

$$u_s^*(l) = \frac{x}{l} = 1 = \max, \quad (48)$$

$$u^*(l) = \frac{th\beta l}{\beta l} = \max, \quad (49)$$

using for this purpose the diagrams of Figure 3, relations (21), (34) at $x = l$ and Tables 1, 2, 3.

Table 2. Numerical data about the function (36)

μ	βl	x	0	$\pm 0,2l$	$\pm 0,4l$	$\pm 0,6l$	$\pm 0,8l$	$\pm l$
$\mu = 0$	1,08866	$\sigma^*(x)$	0,60478	0,61918	0,66304	0,73846	0,84902	1
$\mu = 0,3$	0,65121	$\sigma^*(x)$	0,8199	0,82688	0,84789	0,8833	0,93372	1
$\mu = 0,5$	$\beta l = 0$	$\sigma^*(x)$	1	1	1	1	1	1
Note – compiled by the authors								

Table 3. Estimation in percentage of errors Δ_u, Δ_σ , approximate formulas (20), (21) (or (48)) in relation to the refined dependencies (36), (49).

μ (βl)	0 (1,08866)	0,3 (0,65121)	0,5 (0)
$\Delta_u = \frac{u^*(l) - u_s^*(l)}{u_s^*(l)} \cdot 100\%$	-26,85	-12,09	0
$\Delta_\sigma = \frac{\sigma^*(0) - \sigma_s^*}{\sigma_s^*}$	-39,52	-18,01	0
Note – compiled by the authors			

Concluding our consideration of the example (Figure 3), we present a formula that allows us to quantify the magnitude of the body force X_k for any Poisson's ratio $0 \leq \mu \leq 0,5$.

Let us first designate the value of the dimensionless product $2\beta l$ found from equation (45) as a functional parameter $\zeta = \zeta(\mu)$, depending on μ , that is (see Table 1)

$$2\beta l = \zeta = \zeta(\mu) \quad (50)$$

Replacing the constant β in equality (50) in accordance with (29), we find the coefficient k :

$$2l\sqrt{\frac{k}{E}} = \zeta, \Rightarrow k = \frac{\zeta \cdot E}{4l^2}. \quad (51)$$

Substituting (51) and displacement u , according to relation (34), into the first formula (5), we determine the volumetric quasi-elastic force

$$\begin{aligned} X_k = X_k(x) &= -k \cdot u = -\frac{\zeta \cdot E}{4l^2} \cdot \frac{Pl}{EF \cdot \beta l} \cdot \frac{sh\beta x}{ch\beta l} = \\ &= -\frac{\zeta \cdot P}{2l \cdot F \zeta} \cdot \frac{sh\beta x}{ch0,5\zeta} = -\frac{P}{V} \cdot \frac{sh0,5\zeta \cdot \frac{x}{l}}{ch0,5\zeta}, \end{aligned} \quad (52)$$

depending on the tensile external load P , the volume of the rod $V = 2Fl$ (Figure 3), Poisson's ratio μ and the variable x , changing for the right half of the beam in the interval $0 \leq x \leq l$.

The nature of the found increasing hyperbolic function [Bronshtejn, Semendyaev, et al., 1986] $X_k(x)$ indicates that its maximum will be at the extreme point of the rod $x = l$

$$X_k(l) = -\frac{P}{V} th0,5\zeta = \max; \quad (53)$$

where the tangent $th0,5\zeta$ varies within (see Table 1):

- from $th0,5 \cdot 2,17732 = 0,79639$ to $\mu = 0$,
- up to $th0 = 0$ at $\mu = 0,5$.

The derived formulas (52), (53) show that quasi-elastic mass forces arise in any stressed structure (part), while the known volumetric loads - magnetic, electromagnetic, inertial, gravitational - may not be associated with the deformed state of the material.

An indirect sign of the presence and influence of the quasi-elastic force X_k (Figure 1) are educational laboratory experiments on tensile steel ($\mu = 0,3$) standard samples, when the point of rupture of the rod: 1) almost always approaches its movable end fastening in a special grip of the test bench machine, that is, to the most stressed section of the beam with $\sigma(l) = \sigma_{\max}$, $X_k(l) = \max$; 2) never coincides with the fixed point $x = 0$, where the displacement is $u(0) = 0$ (see (34), Figure 3).

Conclusions:

1) Based on a reasoned conceptual analogy between the ideal physical and engineering models of a solid body (Figure 1,2), it is proposed to supplement the equilibrium equations of the theory of elasticity and resistance of materials with fundamentally new parameters in the form of three projections (5) onto the coordinate axes x, y, z volumetric quasi-elastic force applied to an arbitrary material point.

2) Using the law of conservation of mechanical energy (6), a general computational and theoretical framework has been developed that makes it possible to determine the quasi-elastic volumetric load function for continuous homogeneous isotropic materials that obey Hooke's law.

3) A simple and illustrative example from a typical classical course on strength of materials about uniaxial tension by external static forces P of a linearly elastic weightless rod of constant cross-section is considered (Figure 3). The solution to this problem is brought to the final formulas (16), (17), (29), (34), (35), (45), (49) – (53) and illustrated with diagrams of normal stresses for three values of the Poisson coefficient $\mu = 0; 0,3; 0,5$ (Figure 3). While analyzing the results of this example:

- the dependence of the new body force, according to (52), (53), on the location (coordinates) of an arbitrary material point of the body, the volume of the structure (part) and the transverse deformation coefficient has been proven μ and in the case of $\mu = 0,5$, this mass quasi-elastic force becomes equal to zero; from here it follows, guided by (16), (17), (45), the absence of volumetric potential energy $V_0 = 0$ and non-zero value $V_f \geq 0$ due to a change in the shape of the beam deformed by the load P ;

- a significant (and increasing with decreasing μ) error in the elementary linear formulas (20), (21) of the resistance of materials was established in relation to the obtained refined-modified solution (34), (35), approximated by hyperbolic functional curves (see Figure 3 and Table 2, 3);

- the relevance and great practical significance of taking into account the quasi-elastic volumetric force in the equilibrium equations in the mathematical modeling of the stress-strain state of load-bearing structures and their elements has been confirmed.

Concluding the article and analytically summarizing the overall results of the research work carried out, we can formulate some of the most important considerations and prerequisites on this problematic issue.

Taking into account quasi-elastic volumetric forces X_k, Y_k, Z_k , depending linearly on the corresponding displacements u, v, w (see (5) and Figure 2) involves abandoning the use of the classical concept of static definability of the designed structure when determining stresses, since all mechanical systems in this case become internally statically indeterminate. Of course, this statement does not apply to the external features of the design design, which presuppose the presence of connections (supports), the number of which is equal to the number of equations of equilibrium or motion (in dynamics) to determine the support reactions.

The introduction of the concept of quasi-elastic volumetric load into the applied mechanics of a deformable solid significantly refines the design scheme of a real structure, which makes it possible to identify a number of deep phenomena, properties and features of the designed object that do not appear when using known physical and mathematical models.

From this point of view, a typical example can be the problem of clarifying the fundamental solution of the French mathematician and engineer Gabriel Lamé [Lame, et al., 1852] on the stressed axisymmetric state of an elastic solid cylinder. The authors of article [Abdeev, Muslimanova, et al., 2012] proved that the Lamé model: is not correct and adequate for Poisson's ratio $\mu < 0,5$; contradicts the uniqueness theorem for solving problems in the linear theory of elasticity [Struzhanov, Burnasheva, et al., 2019; Han, et al., 1988; Kac, et al., 2002; Timoshenko, et al., 1975; Lur'e, et al., 1970; Gorshkov, Starovojtov, Tarlakovskij, et al., 2002; Sapunov, et al., 2008; Dudyak, Sahnovich, et al., 2010]; does not agree with the principle of locality of the self-balanced load effect (Saint-Venant's principle [Han, et al., 1988; Timoshenko, et al., 1975; Lur'e, et al., 1970; Gorshkov, Starovojtov, Tarlakovskij, et al., 2002]). The paradox noted in [Abdeev, Muslimanova, et al., 2012] is eliminated by supplementing the

statics equation in the Lamé mathematical model [Lame, et al., 1852] with a radial quasi-elastic body force, but this problem is beyond the scope of this article.

The same calculation scheme of uniaxial tension (Figure 3), but taking into account transverse deformations, is of undoubted scientific, theoretical and practical interest. The consequence of this premise is the introduction of additional projections into the rod element modeled in Figure 3 Y_k, Z_k a quasi-elastic volumetric force (see (5)) and the transformation of a one-dimensional model of the resistance of materials into a spatial one, including 15 sought-after mechanical-geometric characteristics of the stress-strain state. And this is a mathematical problem of the linear theory of elasticity [Struzhanov, Burnasheva, et al., 2019; Han, et al., 1988; Kac, et al., 2002; Skripnyak, Zhukova, Skripnyak, et al., 2005; Timoshenko, et al., 1975; Lur'e, et al., 1970; Sapunov, et al., 2011; Gorshkov, Starovojtov, Tarlakovskij, et al., 2002; Sapunov, et al., 2008; Dudyak, Sahnovich, et al., 2010], which can be significantly simplified to two-dimensional for a beam of circular cross-section, transforming it (the problem) using rectangular coordinates x, r a cylindrical reference system $xr\theta$ into an axisymmetric one, adding two static equilibrium equations (see (5)) with axial $X_k = -k \cdot u$ and radial $R_k = -k \cdot w$ mass restoring (quasi-elastic) loads.

The scientific, technical and methodological aspects of the problem raised are so extensive and multifaceted that they do not allow us to note in this textual material at least the main directions for further promising research. First of all, these can be problems on simple types of resistance of materials, but taking into account the influence of quasi-elastic volumetric forces, including in combination with temperature, inertial loads and, accordingly, kinetic energy. Secondly, the issues of a more precise assessment of the strength, rigidity and stability of structures seem relevant. Here, there may be real prospects for reducing standard safety factors, due to the improvement of mechanical and mathematical models and, ultimately, increasing the reliability and efficiency of structures. Of significant interest in this regard are structural nonlinear [Lukash, et al., 1978], as well as related contact problems [Filin, et al., 1975; Han, et al., 1988; Kac, et al., 2002; Timoshenko, et al., 1975; Lur'e, et al., 1970; Gorshkov, Starovojtov, Tarlakovskij, et al., 2002; Dudyak, Sahnovich, et al., 2010], which are widely used in construction and mechanical engineering [Birger, SHorr, Iosilevich, et al., 1979].

References

- Abdeev B.M., Muslimanova G. (2012). Protivorechie v osesimmetrichnoj klassicheskoj zadache Lamé o napryazhenom sostoyanii uprugogo cilindra / Sb. trudov IX MNPK «Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike» (17 aprelya 2012 g.). – Novosibirsk (Rossiya): Izd-vo «Sibirskaya asociaciya konsul'tantov», s. 46-50.
- Anur'ev V.I. (2006). Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya: v 3-h t., T. 1 – 9-e izd., pererab. i dop. /pod red. I.N. Zhestkovoij. – M.: Mashinostroenie, 928 s.
- Ashcroft N.W., David Cornell N. (2003). Solid State Physics: Cengage Learning (USA), 2003. – 832 p.
- Belyaev N.M. (1965). Soprotivlenie materialov. – M.: Nauka, 856 s.
- Birger I.A., SHorr B.F., Iosilevich G.B. (1979). Raschet na prochnost' detalej mashin: Spravochnik / 3-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 702 s.
- Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A. (1986). Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchihsya vtuzov. 13-e izd. ispr. – M.: Nauka, 344 s.
- Dudyak A.I., Sahnovich T.A. (2010). Prikladnaya teoriya uprugosti. – Minsk: Izd-vo Grevcova, 164 s.
- Feodos'ev V.I. (2001). Soprotivlenie materialov [Tekst]: Uchebnik. – M.: Izd-vo MGTU im. Baumana, 591 s.
- Filin A.P. (1975). Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruemogo tela. T. 1. – M.: Nauka, 832 s.
- Gorshkov A.G., Starovojtov E.I., Tarlakovskij D.V. (2002). Teoriya uprugosti i plastichnosti: Uchebnik dlya vuzov. – M.: FIZMATLIT, 416 s.
- Gurevich A.G. (2004). Fizika tverdogo tela: Uchebnoe posobie dlya vuzov /FTI im. A.F. Ioffe RAN. – SPb.: Nevskij dialekt; BHV – Peterburg, 320 s.
- Han H. (1988). Teoriya uprugosti. Osnovy linejnoi teorii i eyo prilozheniya /per. s nem. – M.: Mir, 344 s.

- Hasbun J.E., Datta T. (2009). Introductory Solid State Physics with MATLAB Application, CPC Press (USA). 550 p.
- Ickovich G.M. (2001). Soprotivlenie materialov: Uchebnik. – M.: Vysshaya shkola, 363 s.
- Kac A.M. (2002). Teoriya uprugosti. – SPb: Izd-vo Lan', 208 s.
- Kamke E. (1976). Spravochnik po obyknovennym differentsial'nym uravneniyam /per. s nem. S.V. Fomina. – M.: Nauka, 576 s.
- Lame G. (1852). Lecons sur la theorie mathematique de l'elasticite des corps solides. Paris, Bachelier, 335 p.
- Lavendel E.G. (1976). Raschet rezinotekhnicheskikh izdelij. – M.: Mashinostroyeniye, 232 s.
- Lukash P.A. (1978). Osnovy nelineynoy stroitel'noy mekhaniki. – M.: Strojizdat, 204 s.
- Lur'e A.I. (1970). Teoriya uprugosti. – M.: Nauka, 945 s.
- Omar A. (1993). Elementary Solid State Physics: Principles and Applications, Pearson (USA), 600 p.
- Patterson J.D. (2019). Solid State Physics: Introduction to the Theory, Springer, B.C. Bailey (USA), 79 p.
- Pavlov A.P., Hohlov A.F. (2000). Fizika tverdogo tela: Uchebnik. – 3-e izd., ster. – M.: Vysshaya shkola, 484 s.
- Sapunov V. T. (2011). Zadachi prikladnoy teorii uprugosti: Uchebnoye posobie dlya vuzov. – M.: Izd-vo Nac. issled. yader. un-ta «Moskovskiy inzhenerno-fizicheskij institut», 208 s.
- Sapunov V.T. (2008). Prikladnaya teoriya uprugosti: v 2 ch. – M.: Izd-vo MIFI, 232 s.
- Skipnyak E.G., Zhukova T.V., Skipnyak V.A. (2005). Matematicheskaya postanovka zadach lineynoy teorii uprugosti: Uchebnoye posobie. – Tomsk: Izd-vo TGU, 26 s.
- Smolyanskij M.L. (1965). Tablicy neopredelennykh integralov. – M.: Nauka, 112 s.
- Strelkov S.P. (1975). Mekhanika: Ucheb. posobie dlya universitetov. – M.: Nauka, 600 s.
- Struzhanov V.V., Burnasheva N.V. (2019). Teoriya uprugosti: osnovnye polozheniya: Uchebnoye posobie. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo un-ta, 204 s.
- Timoshenko S.P., Gere. (1976). Mekhanika materialov /per s angl. A.G. Kornejchuka, pod red. E.I. Grigolyuka. – M.: Mir, 672 s.
- Timoshenko S.P., Gud'ner Dzh. (1975). Teoriya uprugosti /per. s angl. M.I. Rejtmana, pod red. G.S. Shapiro. – M.: Nauka, 576 s.
- Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. (1995). Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti. – M.: Izd-vo Associacii stroitel'nykh vuzov (ASV), 568 s.
- Voronkov I.M. (1961). Kurs teoreticheskoy mekhaniki. – M.: Gos. izd-vo fiziko-matematicheskoy literatury, 596 s.
- Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. (1981). Spravochnik po fizike. – M.: Nauka, 512 s.
- Yavorskiy B.M., Detlaf A.A. (1979). Spravochnik po fizike: dlya inzhenerov i studentov vuzov. – M.: Nauka, 944 s.

Information about authors

Abdeyev Boris Masgutovich – Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor School of architecture, civil engineering and energy NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university», Ust-Kamenogorsk, The Republic of Kazakhstan, m.abdeeva@mail.ru

Baygereev Samat Rakimgalievich – PhD, Senior lecturer International school of engineering NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university», Ust-Kamenogorsk, The Republic of Kazakhstan, samat.baigereyev@mail.ru

Brim Tatyana Fedorovna – Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer International school of engineering NJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university» Ust-Kamenogorsk, The Republic of Kazakhstan, e-mail: tbrim@mail.ru, tel. +7 771 302 4245)

ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО
ENGINEERING AND ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_20
IRSTI 29.19.23

A.S. Zhakypov^{1,2}, T.N. Zhumanov², N.Y. Akhanova¹, M.N. Sultangazina², M.T. Gabdullin¹

¹Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

²al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: szhakupovalibek@gmail.com

E-mail: szhakupovalibek@gmail.com

E-mail: nazym@physics.kz

E-mail: marjan_0309@mail.ru*

E-mail: m.gabdullin@kbtu.kz

ГЕЛЬМГОЛЬЦ КАТУШКА ГЕОМЕТРИЯСЫНЫҢ МАГНИТ ӨРІСІНІҢ ШАМАСЫ МЕН БІРТЕКТІЛІГІНЕ ӘСЕРІ

THE INFLUENCE OF HELMHOLTZ COIL GEOMETRY ON THE MAGNITUDE AND HOMOGENEITY OF THE MAGNETIC FIELD

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ КАТУШКИ ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА ВЕЛИЧИНУ И ОДНОРОДНОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Abstract. *Creating installations capable of generating a stable and controllable homogeneous magnetic field is a complex and urgent technical task in the field of applied engineering. Controlling the magnetic field enables efficient manipulation of ferromagnetic micro- and nanoparticles, which opens up applications of homogeneous magnetic fields in magnetic separation, sensor calibration, and artificial compensation of the Earth's magnetic field. One of the new areas of application of such a homogeneous magnetic field is the magnetic separation of ferromagnetic micro- and nanoparticles. A Helmholtz coil is the most popular technology for creating and controlling a stable homogeneous magnetic field, consisting of two coaxial identical coils separated by a distance equal to their radius. Today, this technology is used in many areas of scientific research and technical applications. Geometrical configurations of the Helmholtz coil such as the shape, number of turns, and spacing between them, have a significant effect on both the magnitude of the magnetic field and its homogeneity. In this paper, theoretical calculations are performed comparing the effect of the geometry of round and square Helmholtz coils on the homogeneity and magnitude of the magnetic field. The calculations took into account the thickness of the coils and the arrangement of the turns. The results showed that the value of the homogeneity zone of the round coil is larger than that of the square coil, but the magnetic induction in this zone is larger for the square coil than for the round coil. When taking into account the thickness, the difference between the coils is smaller than without taking into account the thickness. In further studies, the obtained theoretical calculations of the distribution of the magnetic induction of the Helmholtz coil will be used to analyze the experimental data. Also, based on these calculations, a laboratory prototype for magnetic separation based on the Helmholtz coil will be developed.*

Keywords: *Helmholtz coil, Biot-Savart-Laplace law, magnetic field homogeneity, magnetic field generator, computational model, coil geometry*

Аңдатпа. *Тұрақты және басқарылатын біртекті магнит өрісін құруға қабілетті қондырғыларды құру күрделі және шұғыл техникалық міндет болып табылады. Осындай біртекті магнит өрісін қолданудың жаңа бағыттарының бірі микро- және наноөлшемді ферромагниттік бөлшектердің магниттік бөлінуі болып табылады. Гельмгольц катушкасы тұрақты біртекті магнит өрісін құруға және басқаруға арналған ең танымал технология болып табылады. Бұл технология ғылыми зерттеулер мен техникалық қолданудың көптеген салаларында қолданылады. Гельмгольц катушкасының геометриялық конфигурациялары магнит өрісінің шамасына да, оның біртектілігіне де әсер етеді. Бұл жұмыста дәлгелек және шаршы Гельмгольц катушкаларының геометриясының магнит өрісінің біртектілігі мен шамасына әсерін*

салыстыратын теориялық есептеулер орындалады. Есептеулер катушкалардың қалыңдығын және бұрылыстардың орналасуын ескерді. Нәтижелер шаршы катушканың магнит өрісінің абсолютті мәні дөңгелек катушкаға қарағанда жоғары екенін көрсетті. Дегенмен, дөңгелек Гельмгольц катушкасы магнит өрісінің жақсы біртектілігін көрсетті.

Түйін сөздер: Гельмгольц орамы, Био-Саварт-Лаплас заңы, магнит өрісінің біртектілігі, магнит өрісінің генераторы, есептеу моделі

Аннотация. Создание установок, способных генерировать стабильное и управляемое однородное магнитное поле, является сложной и актуальной технической задачей в области прикладной инженерии. Управление магнитным полем дает возможность эффективно контролировать ферромагнитные микро- и наночастицы, что дает возможность применения однородного магнитного поля в области магнитной сепарации, калибровки сенсоров и искусственного обнуления магнитного поля Земли. Катушка Гельмгольца является самой популярной технологий создания и управления стабильным однородным магнитным полем, состоящая из двух соосных катушек, расстояние между которыми равно их радиусу. На сегодняшний день данная технология используется во многих областях научных исследований и технических приложений. Геометрические конфигурации катушки Гельмгольца, такие как форма, количество витков и расстояние между ними, оказывают существенное влияние как на величину магнитного поля, так и на его однородность. В данной работе выполнены теоретические расчеты, сравнивающие влияние геометрии круглых и квадратных катушек Гельмгольца на однородность и величину магнитного поля. При расчетах учитывалась толщина катушек и расположение витков. Результаты показали, что величина зоны однородности круглой катушки больше, чем у квадратной, но магнитная индукция в этой зоне больше у квадратной катушки, чем у круглой. При учете толщины разница между катушками меньше, чем без учета толщины. В дальнейших исследованиях полученные теоретические расчеты распределения магнитной индукции катушки Гельмгольца будут применены для анализа экспериментальных данных. Также на основе данных расчетов будет разработан лабораторный прототип для магнитной сепарации на основе катушки Гельмгольца.

Ключевые слова: катушка Гельмгольца, закон Био-Савара-Лапласа, однородность магнитного поля, генератор магнитного поля, вычислительная модель

Introduction. Currently, Helmholtz coils have found wide application in various fields of technology due to the design of systems with a controlled uniform magnetic field on their basis and their universal and simple design. "Helmholtz coil" refers to two uniaxial coils located in parallel planes at a distance equal to their radius. The currents in each coil are directed so that the magnetic fields in the center of the two coils add up and reinforce each other (Schill & Hoff, 2001). If using round coils, the distance between them should be equal to their average radius. When using square coils, this distance is 0.5445 – a multiple of the length of one side of the coil (Schill & Hoff, 2001). This distance ensures optimal homogeneity of the magnetic field over the entire area.

Helmholtz coils are used in many technical applications. For example, in (Haghnegahdar et al., 2014), the effective use of pulsed electromagnetic fields created by Helmholtz coils was demonstrated to accelerate the healing process of periodontitis. Helmholtz coils are also of great interest for experiments in space biology (Fontanet, Marcos, & Ribó, 2019; Martino et al., 2010) due to their ability to neutralize the Earth's magnetic field and conduct various abiotic and biological experiments. A system with a controlled magnetic field based on a Helmholtz coil has also found wide application in medicine (Brendan et al., 2015).

Large-area coils are mainly used to nullify the Earth's magnetic field. Thus, many studies aim to optimize Helmholtz coils' design to create more efficient and cost-effective solutions with a larger functional area (Sadiq & Oluyombo, 2019). Such Helmholtz coils are actively used to calibrate magnetic fluxgate magnetometers, where the uniformity of magnetic fields is critically important. These magnetometers are used in geomagnetic observatories to study phenomena associated with geomagnetic storms and the solar-terrestrial system. However, it should be noted that commercial large-area Helmholtz coils are very expensive, and alternative

Helmholtz coil systems are needed to create more efficient coils with a smaller area suitable for testing energy systems (Saqib, Francis, & Francis, 2020; Wang, She, & Zhang, 2002).

One of the new applications of the Helmholtz coil is the control of magnetic microrobots (Ramos-Sebastian & Kim, 2021). To implement the control, systems of three pairs of coils, or so-called 3D coils, were created. The main advantage of these systems is the ability to create a uniform magnetic field and a field gradient. These three-dimensional structures for controlled magnetic field generation in any direction are also used for a detailed characterization of the response of Hall probes (Fontanet et al., 2019). Control of ferromagnetic particles using a controlled magnetic field can be applied in oncological research (Kang et al., 2024) and the separation of magnetic particles (Valeev et al., 2019).

For controlled and repeatable impact on experimental samples, creating a given spatial distribution of a uniform magnetic field is necessary. For these purposes, several studies (Herceg, Juhas, & Milutinov, 2009; Azpurua, 2012; Study and analysis..., n.d.) on the influence of the Helmholtz coil geometry on the level of intensity and uniformity of the magnetic field were conducted, mainly comparing round and square pairs of coils. This relationship between the magnetic field parameters and the physical parameters of the Helmholtz coil will allow the creation of universal laboratory setups. Thus, to calibrate magnetic field sensors used in small satellites such as CubeSats in (Hurtado-Velasco & Gonzalez-Llorente, 2016; Batista et al., 2018; Restrepo et al., 2017), a set of studies was carried out, including both modeling and experimental study of a square Helmholtz coil to determine the magnitude and direction of the magnetic field at any point around the coil. In addition to square and round coil geometries, there are also triangular Helmholtz coils; in the article (Restrepo et al., 2017), comparative calculations of three different geometries with the same coil perimeter were carried out. The results demonstrated high homogeneity of the Helmholtz circular coil. However, these studies did not take into account the thickness of the copper wires and insulation, as well as the arrangement of the turns. In (Crosser et al., 2010), the influence of gaps between adjacent layers of windings caused by the insulation of copper wires was demonstrated in the study of the magnetic field in the geometric center between the coils. Indeed, the influence of the winding location on the intensity of the uniform field is a very important problem. In (Beiranvand, 2017), a study was conducted on the impact of deformation of the cross-sectional shape of small coils on the generated magnetic field, and its homogeneity and optimized system dimensions with increased field homogeneity were proposed.

Thus, at present, many works are devoted to studying the physical parameters of Helmholtz coils and comparing different coil geometries. Still, the lack of comprehensive studies motivates further study of systems based on Helmholtz coils.

This paper presents a comparative study of magnetic field homogeneity and intensity for the most popular Helmholtz coil geometries, supported by the thickness and arrangement of the turns. In addition, this paper presents simplified expressions for the calculations of round and square coils. In this study, for the first time, the influence of both the conductor thickness and the spatial arrangement of the turns was taken into account in the comparative analysis of Helmholtz coil geometries on the homogeneity and magnitude of the generated magnetic field.

Methods. The study of the homogeneity and intensity of the magnetic field created by Helmholtz coils with a given current distribution was carried out according to the Biot-Savart-Laplace law:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{[jI dV, \vec{r}]}{|\vec{r}|^3}, \quad (1)$$

where B is the magnetic induction vector; r – a vector drawn from a given infinitesimal volume element dV to the desired point at which the magnitude of the magnetic field is determined; jI is

the current density I (the index I was introduced to avoid repetition with one of the vectors of the basis of the Cartesian coordinate system, namely with the vector j).

Construction of equations for determining magnetic induction for square and round Helmholtz coils without taking into account the thickness and arrangement of turns

To perform the calculations, the following constants were introduced: the radius of round coils is R , the length of square coils is L , the magnetic constant is μ_0 , and Cartesian coordinate systems are x, y, z . The case of coils with the same number of turns and the same current value is considered.

The equation of one circular ring of the Helmholtz coil, determined on the basis of the diagram shown in Figure 1:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} IR \int_0^{2\pi} \frac{(iz \cos a + jz \sin a + k(R - y \sin a - x \cos a)) da}{((x - R \cos a)^2 + (y - R \sin a)^2 + z^2)^{1.5}}. \quad (2)$$

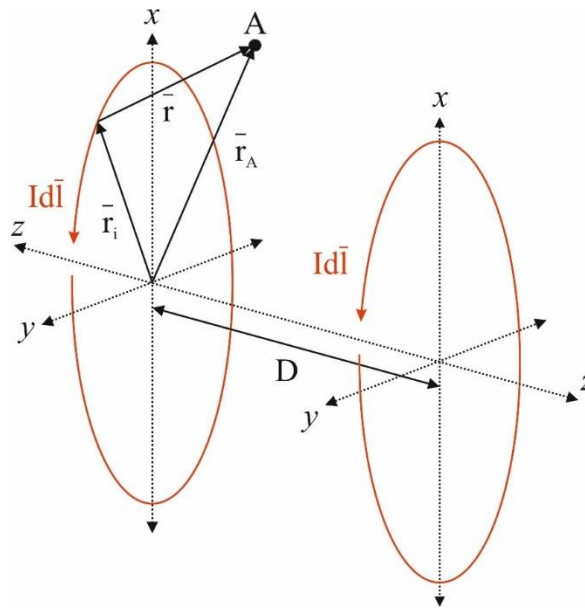


Figure 1. Schematic diagram of a circular Helmholtz coil

Note – compiled by the author

The equation of one square ring of the Helmholtz coil, defined according to Figure 2:

$$\begin{aligned} B &= B_x i + B_y j + B_z k \\ B_x &= z(F_2 - F_4) \\ B_y &= z(F_3 - F_1) \\ B_z &= \left(y + \frac{L}{2}\right) F_1 - \left(x - \frac{L}{2}\right) F_2 - \left(y - \frac{L}{2}\right) F_3 + \left(x + \frac{L}{2}\right) F_4, \end{aligned} \quad (3)$$

where

$$\begin{aligned} F_{1,3} &= \frac{1}{z^2 + \left(y \pm \frac{L}{2}\right)^2} \left(\frac{\frac{x + \frac{L}{2}}{\sqrt{z^2 + \left(y \pm \frac{L}{2}\right)^2 + \left(x + \frac{L}{2}\right)^2}}}{\sqrt{z^2 + \left(y \pm \frac{L}{2}\right)^2 + \left(x - \frac{L}{2}\right)^2}} - \frac{\frac{x - \frac{L}{2}}{\sqrt{z^2 + \left(y \pm \frac{L}{2}\right)^2 + \left(x - \frac{L}{2}\right)^2}}}{\sqrt{z^2 + \left(y \pm \frac{L}{2}\right)^2 + \left(x + \frac{L}{2}\right)^2}} \right), \\ F_{2,4} &= \frac{1}{z^2 + \left(x \mp \frac{L}{2}\right)^2} \left(\frac{\frac{y + \frac{L}{2}}{\sqrt{z^2 + \left(y - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(x \mp \frac{L}{2}\right)^2}}}{\sqrt{z^2 + \left(y - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(x \mp \frac{L}{2}\right)^2}} - \frac{\frac{y - \frac{L}{2}}{\sqrt{z^2 + \left(y - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(x \mp \frac{L}{2}\right)^2}}}{\sqrt{z^2 + \left(y - \frac{L}{2}\right)^2 + \left(x \mp \frac{L}{2}\right)^2}} \right). \end{aligned}$$

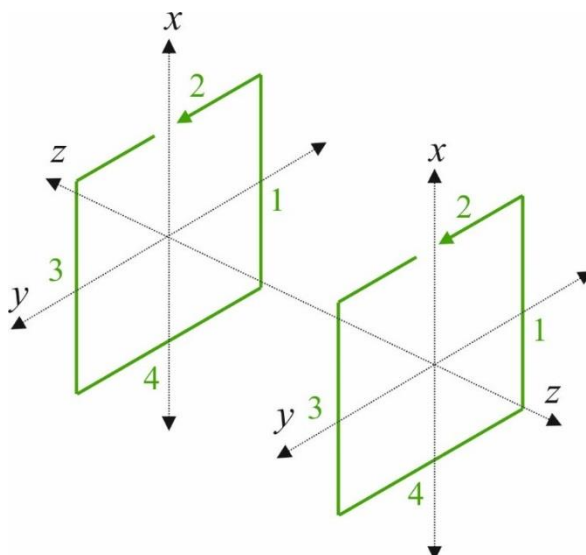


Figure 2. Schematic diagram of a square Helmholtz coil

Note – compiled by the author

The equation of the magnetic induction vector for two rings (Helmholtz coil) is calculated using the superposition principle:

$$B(z) = B^{(1)}(z) + B^{(1)}(z - D), \quad (4)$$

where $B^{(1)}$ is determined by formula (2) or formula (3). The magnetic induction vector can be approximately found for coils with N turns by multiplying the value from formula (4) by N .

Calculations of the magnetic induction vector of Helmholtz coils are carried out at the same current value, number of turns, perimeter ($4L = 2\pi R$), and the optimal distance between them.

The optimal distance between round coils is equal to their radius; for square coils, it is approximately equal to $0.5445L$.

All calculations of magnetic induction and field homogeneity for different Helmholtz coil geometries were performed using the Python programming language with numerical integration, which made it possible to accurately take into account the influence of the conductor thickness and the arrangement of the turns on the magnetic field distribution.

Results and Analysis. Comparison of magnetic fields taking into account the thickness and arrangement of the turns

The formulas below, taking into account the thickness of the coil, are also derived from the Biot-Savart law. The thickness of the wire is designated as 2δ , and the thickness of the insulation is designated as $2s$ (the thickness of the wire and insulation is determined according to Figure 3).

The equation of one circular ring taking into account the thickness, determined according to Figure 3:

$$B = C \int_{\varphi, \rho, z'=\dots}^{\varphi, \rho, z'=\dots} \frac{(i(z-z')\cos\varphi + j(z-z')\sin\varphi + k(\rho - y\sin\varphi - x\cos\varphi))\rho d\varphi d\rho dz'}{((x-\rho\cos\varphi)^2 + (y-\rho\sin\varphi)^2 + (z-z')^2)^{1.5}}, \quad (5)$$

where

$$C \int_{\varphi, \rho, z'=\dots}^{\varphi, \rho, z'=\dots} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{\delta^2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\rho=R-\delta}^{R+\delta} \int_{z'=-\sqrt{\delta^2-(\rho-R)^2}}^{\sqrt{\delta^2-(\rho-R)^2}}$$

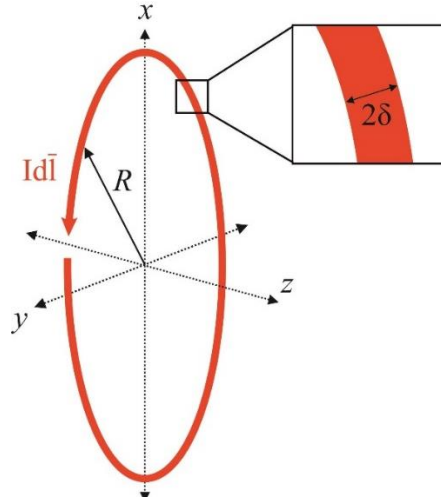


Figure 3. Schematic of one ring of a circular Helmholtz coil taking into account the thickness

Note – compiled by the author

The equation of one square ring taking into account the thickness according to Figure 4:

$$B = \sum_{i=1}^4 (B_i + B'_i), \quad (6)$$

where

$$B_{1,3} = C \int_{\varphi, \rho, z'=\dots}^{\varphi, \rho, z'=\dots} \frac{\left(\mp j(z - \rho \sin \varphi) \pm k \left(y \pm \left(\frac{L}{2} + \delta \right) - \rho \cos \varphi \right) \right) \rho d\varphi d\rho dz'}{\left((z - \rho \sin \varphi)^2 + \left(y \pm \left(\frac{L}{2} + \delta \right) - \rho \cos \varphi \right)^2 + \left(x + \frac{L}{2} - z' \right)^2 \right)^{1.5}}$$

$$B_{2,4} = C \int_{\varphi, \rho, z'=\dots}^{\varphi, \rho, z'=\dots} \frac{\left(\pm i(z - \rho \sin \varphi) \mp k \left(x \mp \left(\frac{L}{2} + \delta \right) - \rho \cos \varphi \right) \right) \rho d\varphi d\rho dz'}{\left((z - \rho \sin \varphi)^2 + \left(x \mp \left(\frac{L}{2} + \delta \right) - \rho \cos \varphi \right)^2 + \left(y + \frac{L}{2} - z' \right)^2 \right)^{1.5}}$$

$$C \int_{\varphi, \rho, z'=\dots}^{\varphi, \rho, z'=\dots} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{\pi \delta^2} \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\rho=0}^{\delta} \int_{z'=0}^L$$

$$B'_{1,3} = \int_{\varphi_1=-\frac{\pi}{2}; \varphi_3=\frac{\pi}{2}}^{0; \pi} \left(C \int_{\rho, z'=\dots}^{\rho, z'=\dots} \right)'$$

$$\frac{\left(i(z - z') \cos \varphi + j(z - z') \sin \varphi + k \left(\rho - \left(y \pm \left(\frac{L}{2} + \delta \right) \right) \sin \varphi - \left(x \mp \left(\frac{L}{2} + \delta \right) \right) \cos \varphi \right) \right) \rho d\varphi d\rho dz'}{\left(\left(x \mp \left(\frac{L}{2} + \delta \right) - \rho \cos \varphi \right)^2 + \left(y \pm \left(\frac{L}{2} + \delta \right) - \rho \sin \varphi \right)^2 + (z - z')^2 \right)^{1.5}}$$

$$B'_{2,4} = \int_{\varphi_2=0; \varphi_4=\pi}^{\frac{\pi}{2}; \pi + \frac{\pi}{2}} \left(C \int_{\rho, z'=\dots}^{\rho, z'=\dots} \right)'$$

$$\frac{\left(i(z - z') \cos \varphi + j(z - z') \sin \varphi + k \left(\rho - \left(y \mp \left(\frac{L}{2} + \delta \right) \right) \sin \varphi - \left(x \mp \left(\frac{L}{2} + \delta \right) \right) \cos \varphi \right) \right) \rho d\varphi d\rho dz'}{\left(\left(x \mp \left(\frac{L}{2} + \delta \right) - \rho \cos \varphi \right)^2 + \left(y \mp \left(\frac{L}{2} + \delta \right) - \rho \sin \varphi \right)^2 + (z - z')^2 \right)^{1.5}}$$

$$\left(c \int_{\rho, z'=\dots}^{\rho, z'=\dots} \right)' = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{\pi \delta^2} \int_{\rho=0}^{2\delta} \int_{z'=-\sqrt{\delta^2-(\rho-\delta)^2}}^{\sqrt{\delta^2-(\rho-\delta)^2}}$$

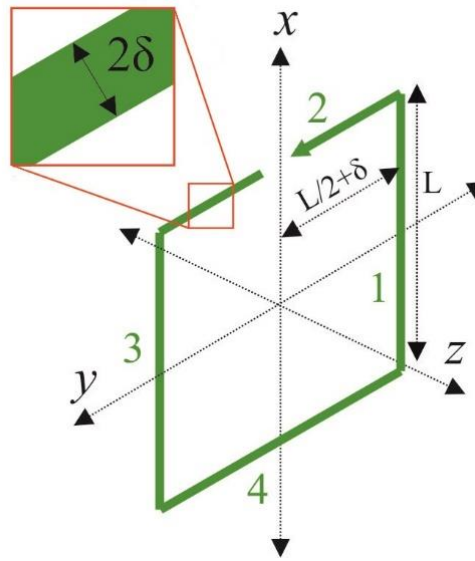


Figure 4. Schematic of one ring of a square Helmholtz coil taking into account the thickness
Note – compiled by the author

The resulting magnetic field is calculated using formula (7), where the values of N_a and N_b are defined in Figure 5.

If N_a is an even number, then

$$B = \sum_{k=1}^2 \left(\sum_{j=1}^{N_b} \left(\sum_{i=1}^{\frac{N_a}{2}} [B(z + (\delta + s)(-1)^k + 2(\delta + s)(i - 1)(-1)^k, G)] \right) \right),$$

$$G = R + 2(\delta + s)(j - 1),$$

$$G = 2 \left(\frac{L}{2} + 2(\delta + s)(j - 1) \right).$$

If N_a is an odd number, then

$$B = B(z, R) + \sum_{k=1}^2 \left(\sum_{j=1}^{N_b} \left(\sum_{i=1}^{\frac{N_a-1}{2}} [B(z + 2i(\delta + s)(-1)^k, G)] \right) \right),$$

$$B = B(z, R) + \sum_{k=1}^2 \left(\sum_{j=1}^{N_b} \left(\sum_{i=1}^{\frac{N_a-1}{2}} (B(z + 2i(\delta + s)(-1)^k, R + 2(\delta + s)(j - 1))) \right) \right), \quad (7)$$

For square and round coils, the values are calculated on the z -axis at $x=y=0$, with the same perimeter $4L + 2\pi\delta = 2\pi R$, the same current ($I=3$ A), the number of turns $N_a = N_b = 20$ and at the optimal distance. Insulation thickness is $s = 0.1$ mm, and the wire thickness is $\delta = 1.4$ mm.

The optimal distance for a round coil is defined as:

$$D = R + N_b(\delta + s). \quad (8)$$

For a square coil, the optimal distance is calculated using the equation:

$$D = 0.5445(L + 2N_b(\delta + s)). \quad (9)$$

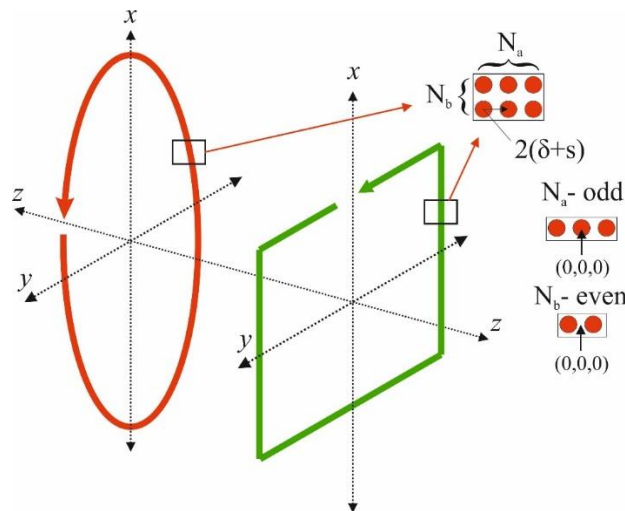


Figure 5. Taking into account the arrangement of turns δ and the thickness of the insulation s .

Note – compiled by the author

The calculations were obtained by integrating using the Newton-Cotes formula (a second-degree polynomial was used). The relative errors are determined using the Runge method as $\frac{|I_{2h}-I_h|}{I_{2h}}$ (where I_h is the approximately calculated integral with the number of steps h), are less than 0.5% for all calculated values.

For a more visual comparison, we will place the center of the coordinate system in the middle between the rings, i.e., the formulas above use the value $B(z) = B\left(z + \frac{D}{2}\right)$.

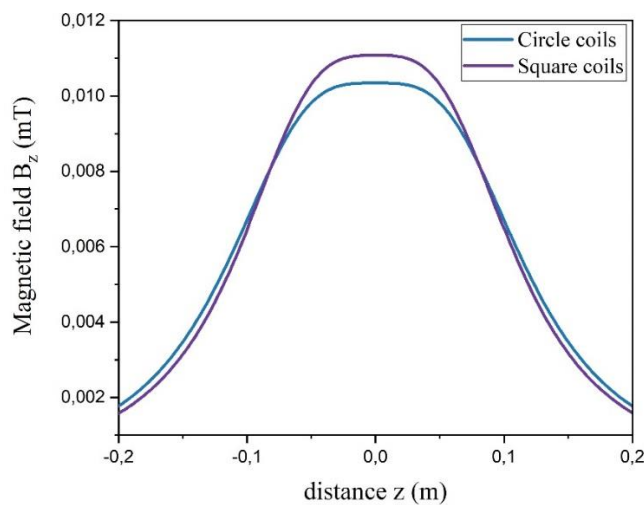


Figure 6. Distribution of the magnetic field of a pair of round and square Helmholtz coils on the z -axis

Note – compiled by the author

Figure 6 shows a comparison of the magnetic field intensity of a round and square coil. A comparison of the magnetic field homogeneity is shown in Figure 7.

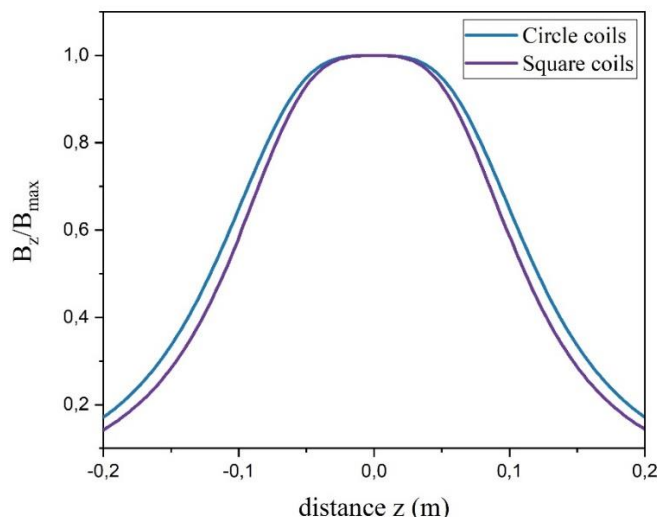


Figure 7. Normalized distribution of the magnetic field of a pair of round and square Helmholtz coils
Note – compiled by the author

From the graphs shown in Figures 6 and 7, it is evident that the homogeneity zone is better for the round coil. The absolute value is higher for the square coil ($\frac{B_{z,KB}(z=0)}{B_{z,KP}(z=0)} \approx 1.07$, i.e., a 7% stronger field, without taking into account the thickness of the coil — $\frac{B_{z,KB}(z=0)}{B_{z,KP}(z=0)} \approx 1.1532$). For a round coil, the relative distance at which the field is 99% of the maximum is $\frac{z}{R+N_b(\delta+s)} \approx 0.29$ (0.3137 excluding the coil thickness), for a square coil it is $\frac{z}{R+N_b(\delta+s)} \approx 0.26$ (0.2692 excluding the coil thickness), the difference between the relative distances taking into account the thickness is $\frac{0.29}{0.26} \approx 1.1154$ or 12% (17% excluding the coil thickness).

Conclusions. This research paper describes the basic theoretical measurements of the magnetic induction generated by a round and square Helmholtz coil, taking into account the thickness and arrangement of the turns and a comparison of their magnetic induction. Calculations show that the value of the homogeneity zone of the round coil is larger than that of the square coil, but the magnetic induction in this zone is larger for the square coil than for the round coil. When taking into account the thickness, the difference between the coils is smaller than without taking into account the thickness.

In future studies, the obtained theoretical calculations of the distribution of magnetic induction of the Helmholtz coil will be experimentally compared. Based on the theoretical calculations, a laboratory prototype based on a Helmholtz coil is being developed for the magnetic separation of industrial fly ash.

Acknowledgments. This research has been funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR21882301)

References

- Schill, R. A., Jr., Hoff, K. (2001). Characterizing and calibrating a large Helmholtz coil at low AC magnetic field levels with peak magnitudes below the earth's magnetic field. *Review of Scientific Instruments*, 72(6), 2769–2776, <https://doi.org/10.1063/1.1368853>.
- Haghnegahdar, A., Khosrovpanah, H., Andisheh-Tadbir, A., Mortazavi, G. (2014). Design and fabrication of Helmholtz coils to study the effects of pulsed electromagnetic fields on the healing process in periodontitis: Preliminary animal results. *Journal of Biomedical Physics & Engineering*, 4(3), 83–90.

- Fontanet, A., Marcos, J., Ribó, L. (2019). Design and construction of 3D Helmholtz coil system to calibrate 3D Hall probes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1350, 012167, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1350/1/012167>.
- Martino, C. F., Portelli, L., McCabe, K., Hernandez, M., Barnes, F. (2010). Reduction of the earth's magnetic field inhibits growth rates of model cancer cell lines. *Bioelectromagnetics*, 31(7), 649–655, <https://doi.org/10.1002/bem.20606>.
- Brendan, D., Watson, J. C., Bartlett, P., Renzoni, F. (2015). Toward an automated setup for magnetic induction tomography. *IEEE Transactions on Magnetics*, 51(1), 1–4, <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2355420>.
- Sadiq, U. A., Oluyombo, O. W. (2019). Optimization design and characterization of Helmholtz coils. *Journal of Information Engineering and Applications*, 9(4), <https://doi.org/10.7176/JIEA/9-4-05>.
- Saqib, M., Francis, S. N., Francis, J. N. (2020). Design and development of Helmholtz coils for magnetic field. In *International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, 1–5, <https://doi.org/10.1109/REEPE49198.2020.9059109>.
- Wang, J., She, S., Zhang, S. (2002). An improved Helmholtz coil and analysis of its magnetic field homogeneity. *Review of Scientific Instruments*, 73(6), 2175–2179, <https://doi.org/10.1063/1.1471352>.
- Ramos-Sebastian, A., Kim, S. H. (2021). Magnetic force-propelled 3D locomotion control for magnetic microrobots via simple modified three-axis Helmholtz coil system. *IEEE Access*, 9, 128755–128764, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3113765>.
- Fontanet, A., Marcos, J., Ribó, L., Massana, V., Campmany, J. (2019). Design and construction of 3D Helmholtz coil system to calibrate 3D Hall probes. *Journal of Physics: Conference Series*, 1350, 012167, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1350/1/012167>.
- Kang, K., Lee, S. Y., Kim, C. S., Park, C. H. (2024). Hybrid magnetic field system with Helmholtz coils and magnets for real-time circulating tumor cell separation. *Sensors and Actuators A: Physical*, 370, 115229, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115229>.
- Valeev, D., Kunilova, I., Alpatov, A., Varnavskaya, A., Ju, D. (2019). Magnetite and carbon extraction from coal fly ash using magnetic separation and flotation methods. *Minerals*, 9(5), 320, <https://doi.org/10.3390/min9050320>.
- Herceg, D., Juhas, A., Milutinov, M. (2009). A design of a four square coil system for a biomagnetic experiment. *Facta Universitatis Series: Electronics and Energetics*, 22(3), 285–292.
- Azpuru, M. A. (2012). A semi-analytical method for the design of coil systems for homogeneous magnetostatic field generation. *Progress in Electromagnetics Research B*, 37, 171–189.
- Study and analysis of magnetic field homogeneity of square and circular Helmholtz coil pairs: A Taylor series approximation. (n.d.).
- Hurtado-Velasco, R., Gonzalez-Llorente, J. (2016). Simulation of the magnetic field generated by square shape Helmholtz coils. *Applied Mathematical Modelling*, 40(23–24), 9835–9847, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.06.027>.
- Batista, D. S., Granziera, F., Tosin, M. C., de Melo, L. F. (2018). Three-axial Helmholtz coil design and validation for aerospace applications. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54(1), 392–403, <https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2760560>.
- Restrepo, A. F., Franco, E., Cadavid, H., Pinedo, C. R. (2017). A comparative study of the magnetic field homogeneity for circular, square and equilateral triangular Helmholtz coils. In *2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT)* (pp. 13–20), <https://doi.org/10.1109/ICEECCOT.2017.8284514>.
- Crosser, M. S., Scott, S., Clark, A., Wilt, P. M. (2010). On the magnetic field near the center of Helmholtz coils. *Review of Scientific Instruments*, 81(8), 084701, <https://doi.org/10.1063/1.3474227>.
- Beiranvand, R. (2017). Effects of the winding cross-section shape on the magnetic field uniformity of the high field circular Helmholtz coil. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(9), 7120–7131, <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2686302>.

Information about authors

Zhakypov Alibek – Master of Engineering and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: szhakupovalibek@gmail.com, ORCID: 0009-0001-9904-318X, +7 705 141 65 69

Zhumanov Temirkhan – Undergraduate student, 4th year, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: szhakupovalibek@gmail.com, +7 701 773 77 24

Akhanova Nazym – PhD, Kazakh-British Technical University, E-mail: nazym@physics.kz, ORCID: 0000-0003-2767-8711, +7 707 783 96 55

Sultangazina Marzhan – Master of Engineering and Technology, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: marjan_0309@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8162-096X, +7 777 807 88 11

Gabdullin Maratbek – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, PhD, Professor, Kazakh-British Technical University, E-mail: m.gabdullin@kbtu.kz, ORCID: 0000-0003-2767-8711, +7 777 807 88 11

МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_30
IRSTI 55.01.11

A. Muzdybayeva¹, A. Mashekenova², V. Rogovsky³, V. Yakovlev⁴, A. Mukhamedova⁵

D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

¹E-mail: amuzdybaeva@mail.ru*

²E-mail: assiya173@mail.ru

³E-mail: gerat1302@mail.ru

⁴E-mail: vel1051@yandex.ru

⁵E-mail: m_amina1711@mail.ru

INNOVATIVE MODEL OF ENGINEERING PERSONNEL TRAINING ACCORDING TO EPIP INTERNATIONAL STANDARDS

ЕРІП ХАЛЫҚАРАЛЫҚ СТАНДАРТТАРЫНА СӘЙКЕС ИНЖЕНЕРЛІК ҚЫЗМЕТКЕРЛЕРДІ ДАЙЫНДАУДЫҢ ИННОВАЦИЯЛЫҚ ҮЛГІСІ

ИННОВАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОБУЧЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ ПО МЕЖДУНАРОДНЫМ СТАНДАРТАМ ЕРІП

Abstract. The training of engineering personnel in the field of road transport requires innovative approaches based on international training standards. The educational process in this area should be carried out in certified centers that have the appropriate material and technical base. "Engineering" is the foundation of the EPIP learning model. "Engineering" is the beginning of "practice-oriented," "innovation-oriented," and "project-oriented" learning, without which EPIP would not be possible. Levels of PIPE application. In terms of application, the EPIP mainly consists of three levels, namely the macro level, the intermediate level and the micro level, which correspond respectively to the EPIP educational theory, the EPIP specialty theory and the EPIP curriculum theory. EPIP is an adapted program that aims to promote the economic and social development of the region, increase the competitiveness of academies, develop basic professional skills and technologies, and promote the dissemination of knowledge and technology. For teachers, the application of EPIP is to find and create appropriate engineering goals and engineering conditions (in the real world and in real life) for students, developing students in "one project after another" according to engineering goals and conditions; implementation of the integration of teaching, learning and practical activities, as well as the integration of knowledge, technology and professional skills. qualities combined; teach students to learn and act. The article discusses the features of the implementation of personnel training on the basis of the Lu Ban Workshop certified center. Attention is paid to the content of engineering competencies and skills in accordance with international EPIP standards.

Keywords: EPIP, engineering personnel, transport, engineering competencies, concept.

Аңдатпа. Автомобиль көлігі саласында инженерлік кадрларды даярлау халықаралық оқыту стандарттарына негізделген инновациялық тәсілдерді қажет етеді. Бұл бағыттағы оқу процесі тиісті материалдық-техникалық базасы бар сертификатталған орталықтарда жүргізілуі керек. "Инженерлік" - бұл еріп оқыту моделінің негізі. "Инженерлік" -бұл "тәжірибеге бағытталған", "инновациялық бағытталған" және "жобаға бағытталған" оқытудың бастауы, онсыз ЕРІП мүмкін емес еді. PIPE қолдану деңгейлері. Қолдану тұрғысынан ЕРІП негізінен үш деңгейден тұрады, атап айтқанда еріп білім беру теориясына, еріп мамандық теориясына және еріп оқу бағдарламасының теориясына сәйкес келетін макродеңгей, орта деңгей және микро деңгей. ЕРІП-бұл аймақтың экономикалық және әлеуметтік дамуына ықпал етуге, академиялардың бәсекеге қабілеттілігін арттыруға, негізгі кәсіби дағдылар мен технологияларды дамытуға, білім мен технологиялардың таралуына ықпал етуге бағытталған бейімделген бағдарлама. Оқытушылар үшін еріп қолдану студенттер үшін тиісті инженерлік мақсаттар мен инженерлік жағдайларды (нақты әлемде және нақты өмірде) табу және құру, инженерлік мақсаттар мен шарттарға сәйкес студенттерді «бір жобадан екіншісіне» дамыту болып табылады; оқытуды, зерттеуді және практикалық қызметті интеграциялауды,

сондай-ақ білімді, технологияны және кәсіби дағдыларды интеграциялауды енгізу. қасиеттер біріктірілген; студенттерді үйренуге және әрекет етуге үйрету. Мақалада Лу Бан шеберханасының сертификатталған орталығы негізінде кадрларды оқытуды жүзеге асыру ерекшеліктері қарастырылған. EPIP халықаралық стандарттарына сәйкес инженерлік құзыреттер мен дағдылардың мазмұнына назар аударылады

Түйін сөздер: EPIP, инженерлік кадрлар, көлік, инженерлік құзыреттер, тұжырымдама.

Аннотация. Подготовка инженерных кадров в сфере автомобильного транспорта требует инновационных подходов, основанных на международных стандартах обучения. Образовательный процесс по данному направлению должен осуществляться в сертифицированных центрах, которые имеют соответствующую материально-техническую базу. «Инженерное дело» – это основа модели обучения EPIP. «Инженерное дело» – это начало «практико-ориентированного», «инновационно-ориентированного» и «проектно-ориентированного» обучения, без которого EPIP был бы невозможен. Уровни применения PIPE. С точки зрения применения, EPIP в основном состоит из трех уровней, а именно макроуровня, среднего уровня и микроуровня, которые соответственно соответствуют теории образования EPIP, теории специальности EPIP и теории учебной программы EPIP. EPIP – это адаптированная программа, которая направлена на содействие экономическому и социальному развитию региона, повышение конкурентоспособности академий, развитие основных профессиональных навыков и технологий, содействие распространению знаний и технологий. Для преподавателей применение EPIP заключается в поиске и создании надлежащих инженерных целей и инженерных условий (в реальном мире и в реальной жизни) для студентов, развитии студентов в «одном проекте за другим» в соответствии с инженерными целями и условиями; внедрении интеграции преподавания, изучения и практической деятельности, а также интеграции знаний, технологий и профессиональных навыков. качества вместе взятые; учите студентов учиться и действовать. В статье рассмотрены особенности реализации подготовки кадров на базе сертифицированного центра Мастерской «Лу Бань». Уделено внимание содержанию инженерных компетенций и навыков в соответствии с международными стандартами EPIP.

Ключевые слова: EPIP, инженерные кадры, транспорт, инженерные компетенции, концепция.

Introduction. Current problems of engineering education in the Republic of Kazakhstan include a number of issues that require comprehensive solutions. The main aspect is insufficient representation of national engineering education in international communities. Limited collaboration does not ensure proper integration into the world system, where the USA, Japan, Great Britain and South-East Asia are leading. The national accreditation system is not oriented to international standards such as Engineering Practice Innovation Project (EPIP) teaching method. For example, Kazakhstan lacks a system of certification of professional engineers according to international standards in the field of transport and transport machinery. In order to solve such issues, the “Lu Ban Workshop” project was created. In this center it is planned to jointly train students of D. Serikbayev EKTU on educational programs “Transport, transport machinery and technology” with the application of the Engineering Practice Innovation Project (EPIP) teaching method by using advanced Chinese equipment. In addition, it is planned to train certified personnel in the field of road transport within the framework of specialized industry unions professional qualifications. The “Lu Ban Workshop” project will become a center for training professional specialists under international standards.

The opening ceremony was attended by Ermek Kosherbayev - Head of East Kazakhstan Region, Sayasat Nurbek - Minister of Science and Higher Education, Saule Rakhmetullina - Rector of EKTU, a delegation led by Consul General of the People's Republic of China Jiang Wei (Figure 1).

LuBan Workshop project shares the teaching model, professional standards, technical equipment, materials and resources of Chinese vocational education with the world ‘LuBan Workshop’ was established under the ‘One Belt, One Road’ initiative to build a community of unified human destiny. “Workshop Lu Ban” is an international education cooperation project to

realize the internationalization, branding and systematization of Chinese vocational education. The project is built on the principles of equal cooperation, prioritizing quality, focusing on competence and skill development, integrating industry and education, and adapting to local conditions. The project involves physical institutions outside China to provide academic education and technical training.



Figure 1. The opening ceremony

Note – compiled by the author

On February 26, 2024, President Kassym-Jomart Tokayev visited D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, where he saw all activities of the university and the “Lu Ban Workshop” training center (Figure 2). The project provides for further strengthening of cooperation between Kazakhstan and China in the field of applied technologies and higher technical education, as well as support for the “One Belt, One Road” initiative.



Figure 2. Meeting in “Lu Ban Workshop” training center

Note – compiled by the author

One of the goals of the university is to train highly qualified technical and engineering personnel for the automotive industry of Kazakhstan on the “Lu Ban Workshop” basis.

As part of the workshop opening an agreement was created by EKTU and Tianjin Vocational Institute for the establishment of “Kazakhstan Engineering Center for Application and Improvement of Automotive Intelligent Technologies”.

Methods and materials. The “Lu Ban Workshop” has two laboratories – “Innovative Car Designs” and “SMART Car Technologies” (Figure 3 and Figure 4).



Figure 3. Vehicles in “Lu Ban Workshop” training center

Note – compiled by the author

The uniqueness of the Center lies in the possibility for trainees to obtain practical skills and conduct simulation tests of automotive systems. Special attention is paid to learning the latest technologies for maintenance and diagnostics of electric and hybrid vehicles.



Figure 4. Smart room in “Lu Ban Workshop” training center

Note – compiled by the author

The project is based on China's local vocational education innovation training model, "EPIP". EPIP is an engineering practice-oriented training model that aims to cultivate competent technical talents through extensive engineering practice based on real or simulated engineering projects (LU J Q, MA Y, YANG Y, et al., 2016; LU J Q, TANG X H, SHI Y X at el., 2017; LU J Q, GENG J. at el., 2020) (Figure 5).

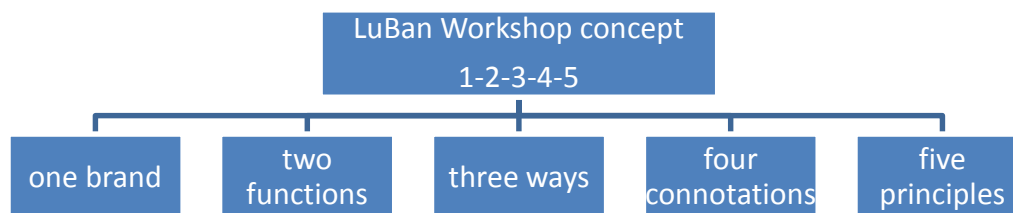


Figure 5. LuBan Workshop concept 1-2-3-4-5

Note – compiled by the author

The logo of the EPIP teaching model is designed with an up-down structure, in which the upper part is an opened book and the lower part is a rotating gear (Figure 6). The book and the gear are intertwined to each other, symbolizing the integration of theory and practice and the unity of knowledge and action (LU J Q et al., 2020; LU J Q et al., 2021; LU J Q, ZHANG W et al., 2021).



Figure 6. The logo of the EPIP Teaching Model

Note – compiled by the authors on the basis of (LU J Q, 2020)

The four letters of E, P, I, P on the pages of the book "match" the shape of the book, which forms an "opened" book. This implies openness and share. EPIP is the acronym of Engineering, Practice, Innovation and Project. This presents the essential "Four Elements" of EPIP teaching model, namely engineering, practice, innovation, and project. The initial letter "E" adopts the "symbolic shape" of the source of Chinese culture, signifying the development tendency of being newly born and growing upwards and outwards. As an important part of Luban Workshop international development research, this issue comprehensively relates the overall contents of the teaching model applied in Luban Workshop—Engineering Practice Innovation Project (EPIP). It provides an in- depth explanation of the model construction, key elements, application framework, logo configuration and cultural inheritance from the principle level and discourse perspective. It systematically explains the development path and achievements of "engineering" of vocational education, "engineering" of EPIP and Alliance EPIP International Education. It expands and interprets the four key essentials of EPIP: "engineering-driven", "practice-oriented", "innovation-targeted" and "project- based". EPIP education theory, EPIP specialty theory and EPIP curriculum theory are discussed from macro level, medium level and micro

level respectively. The significance of the application of EPIP teaching model for the adaptive development of vocational education is discussed from the perspective of "life education" (GENG J, at el., 2021; LU J Q, REN X H. at el., 2021; LU J Q at el., 2022).

Teaching Model and EPIP include several aspects:

1. Knowledge of the specialty (application of the specialty based on "reality")
2. Review of courses (application of courses based on "reality")
3. Knowledge and skills (learning content based on "reality")
4. Real world, real life (engineering)
5. Integration of theory and practice (practice)
6. Based on practice and serving practice (Innovation)
7. Full process and implementation from start to finish (Projects)
8. Flexible mode based on the law of learning (Method)

There is no universally accepted understanding of "teaching model" at home and abroad. In China, there are three kinds of summaries about "teaching model". The first is that teaching model is "a theory of designing and organizing the teaching activities, formed in the teaching practice, which is expressed in simplified form", which can be called "the theory doctrine". The second is that teaching model is "the basic structure or framework of various types of teaching activities established under the guidance of certain teaching ideas or theories", which can be called "the structure doctrine". The third is that teaching model is "a relatively fixed teaching procedure and its implementation strategy system established under the guidance of a certain teaching ideology to complete the proposed teaching tasks", which can be called "the procedural doctrine" (LU J Q at el., 2019; LU J Q at el., 2021; LU J Q at el., 2022). The practice has proved that any one-sided, isolated, and general investigation and study of foreign vocational education while ignoring the environment, soil, nature, and adaptation of vocational education to introduce and promote foreign vocational education, original absorption and application, may lead to educational errors. In the world, every country is supposed to choose its suitable vocational education mode according to its own national conditions and educational environment, according to its social demand for vocational education and the requirements of the students, rather than blindly copy others. EPIP is an organic integration of Engineering, Practice, Innovation and Project, with capacities of engineering-driven, practice-oriented, innovation-targeted and project-based (Table 1).

Table 1. "Four Elements" of EPIP

Elements	Characteristic
"Engineering"	"Engineering" is the foundation of EPIP. "Engineering" of EPIP means that vocational education needs to teach students to solve the problems in "real" and "practical" conditions, aims to make students work and live with high proficiency in the real world.
"Practice"	"Practice" refers to the practical activities in the whole process of education and teaching. It is also a real educational practice and teaching practice of "integration of industry and education, school-enterprise cooperation, combination of work and learning, and integrity of knowledge and action
"Innovation"	Innovation is both a process and a result. In EPIP teaching, the training of innovation ability is very important. In the process of teaching, many cases are specific teaching and learning in the environment of high simulation, virtual situations, and conceptual reasoning.
"Project"	The cultivation of key abilities is mainly project based. Every curriculum, every activity and every step requires to reflect the integrity, procedure and entirety. Teachers should guide students (teams) to continuously "finish" the entire thing, "teach" the complete thing and "learn" the complete thing one by one.
<i>Note – compiled by the author</i>	

The "Three Truths" realm of reality, name, and harmony is an important way for us to understand the essence of EPIP. The coupling of name and reality is called harmony. The formation of the realm of "harmony" is not natural. It can only be achieved through the active, positive, and continuous efforts of "teaching" and "learning", and requires the "will" of our subjective motivation and the "action" of our practical action.

The cores of EPIP are "reality" and "integrity". It also enables the integration of industry and education. For teachers, the application of EPIP is to seek and create proper engineering targets and engineering conditions (real world and real life) for students, cultivate students in "one project after another" under the engineering targets and conditions; implement the integration of teaching, learning and doing and integrate knowledge, technology and professional qualities together; teach students to learn and do. For students, it is necessary to know engineering, master engineering technology, develop engineering logic and qualifications; attain the abilities of learning to study, to use and to innovate in "one project after another" in the process of teaching, learning and doing (LU J Q. at el., 2022; LU J Q at el., 2012; LU J Q at el., 2019).

The aim of EPIP is the integrity of knowledge and action. EPIP is the teaching model that emphasizes "building a career with the application", the teaching model in the field of vocational education, which takes serving development as the aim, promotes employment as the orientation, serves production and life; and also the teaching model in the field of training innovative, comprehensive, applied technical and skilled talents. EPIP is a thought, a method, a path, an enlightenment and also the exploration.

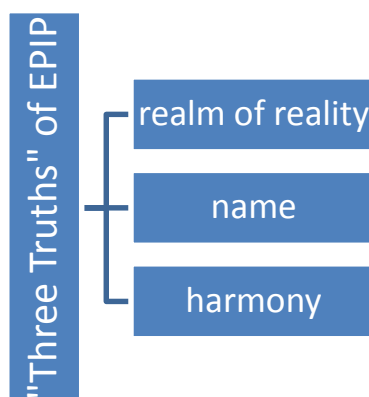


Figure 7. "Three Truths" of EPIP

Note – compiled by the author

Results. As a result of investigation, we may see the bright vision of educational process, based on EPIP standards:

1) Engineering Practice Innovation Project (EPIP) is an exploration of Chinese vocational education in the fields of mode, discourse, identification and system.

2) The core essentials of EPIP are: one Aim, two Cores, three Truths, four Elements and five Levels, summed up as 12345 of EPIP.

- One Aim is the integrity of knowledge and action;
- Two Cores are reality and integrity;
- Three Truths are realms of name, reality and harmony;
- Four Elements are engineering-driven, practice-oriented, innovation-targeted and project-based;
- Five Levels are levels of cosmic, macro, medium, micro and nano.

"Engineering" is the foundation of EPIP teaching model. "Engineering" is the beginning of "practice-oriented", "innovation-targeted" and "project-based". Without real "engineering", EPIP would not have been possible. Application levels of EPIP. From the perspective of application, EPIP mainly has three levels, namely, macro level, medium level and micro level, which respectively correspond to EPIP education theory, EPIP specialty theory and EPIP curriculum theory.

EPIP is a kind of path that focuses on serving regional economic and social development, constructing the core competitiveness of academies, developing professional core skill and technology, promoting the advancement of knowledge and technology.

EPIP teaching model reflects the new changes of industries by timely using engineering approaches, actively adapts to the new requirements of economic and social development in the new normal for application-oriented technicians, promotes teachers to improve their engineering ability, introduces engineering cases in the syllabus, exhibits engineering properties in the teaching process, and simulates the engineering environment in teaching site to function as a tool to implement the mechanism of industry-education integration and cooperative education at the operational level, and a "new key" to innovate talent training model and build teaching standard system.

EPIP is one of the inherent essentials of Luban Workshops. Luban Workshops should take EPIP as the teaching model which should be reflected in the teaching design, and dedicate themselves to cultivating overseas students' vocational quality, professional and technical skills, comprehensive practical ability and innovative ability.

The EPIP will support and organize members, experts and scholars to carry out practical and theoretical research on cultivating technicians from the perspective of EPIP, explore the path of EPIP curriculum system construction in various professional fields. Based on mechatronics and expanding to e-commerce, economy and trade in general, etc., the research explores the path of building EPIP curriculum structure. Based on the EPIP curriculum structure, teaching theory of professional courses and practice system, an effective system of cultivating applied technical talents should be established, providing theoretical support and duplicable models for cultivating talents with vocational skills in the new economic normal.

EPIP is an organic integration of Engineering, Practice, Innovation and Project, and also a teaching model of training technical talents with practical engineering as the background and foundation, engineering practice as the orientation and penetration, capability cultivation as the target and dependence, intensifying practice and innovation, and engineering project as the guidance.

Conclusion. Vocational centers should focus on the development of regional economy, continue to explore the operational mechanism of specialized (groups) service industries, analyze the developing trend of industries, trades, enterprises and occupations of the region it serves, satisfy the actual needs, optimize the matched-degree of running schools and its demands, explore and construct the mechanism with the core competence of 'service-accumulation -incubation-optimization' so as to improve the ability to serve the society.

EPIP medium specialty theory is the specialty development mode of 'integration of core technologies'. Schools and enterprises seek, discuss and confirm together the core technical skills of specialties, guarantee that the industries, sectors, enterprises and occupations integrate into specialty development in an all-around way by carrying out "four-integration", and provide cooperative development platforms and shared future carrier for their jointly developing specialties, team teaching, cultivating talents and win-win development. The search, extraction, selection and confirmation of core technology and skills guarantee "building specialty development through its application".

For teachers, the application of EPIP teaching model is to seek and create proper engineering targets and engineering conditions (real world and real life) for students, cultivate students

under the engineering targets and conditions with the integration of teaching, learning and practicing; teach students to learn and do. For students, it is necessary to know engineering, master engineering technology, structure, tools and crafts, and develop engineering logic and qualifications; attain the abilities of learning to study, to use and to innovate in practice.

References

- LU J Q, MA Y, YANG Y, et al. Vocational education: supply-side structural reform [J]. Chinese Vocational and Technical Education, 2016 (9): 15-19.
- LU J Q, TANG X H, SHI Y X. Research and practice of Engineering Practice Innovation Project (EPIP) teaching model [J]. Chinese Vocational and Technical Education, 2017 (5): 10-14.
- LU J Q, GENG J. Exploring the curriculum theory of EPIP teaching model [J]. Joint Journal of Tianjin Vocational Institutes, 2020 (11): 3-7.
- LU J Q, RUI Z B. Exploring the professionalism of EPIP teaching model [J]. Joint Journal of Tianjin Vocational Institutes, 2020 (12): 3-7,17.
- LU J Q, SHEN Y. Exploring the pedagogy of EPIP teaching model [J]. Joint Journal of Tianjin Vocational Institutes, 2021 (4): 3-6.
- LU J Q, ZHANG W J, MI J. "Engineering" of EPIP: talking from life education of Tao Xingzhi[J]. Chinese Vocational and Technical Education, 2021 (2): 14-17.
- GENG J, LI Z D, ZHANG L. Alliance EPIP International Education: developing path, effect and prospect [J]. Vocational Education Research, 2021 (11): 11-17.
- LU J Q, REN X H. The adaptive development of China's vocational education from Tao Xingzhi's educational perception: commemorating the 130th anniversary of Mr Tao's birth[J]. Vocational Education Research, 2021 (12): 4-10.
- LU J Q. On the training of new teachers in vocational institutes and structural team-building for "double-qualified" teachers: Training mechanism and path of "double-qualified" teachers from the perspective of EPIP [J]. Vocational Education Research, 2022(2): 9-15.
- LU J Q. Inheriting the essence of Huang Yanpei's vocational education thought and promoting the innovation of modern vocational education theory and practice: on the 105th anniversary of the founding of China Vocational Education Association[J]. Vocational Education Research, 2022(5): 5-9.
- LU J Q. Tutorial of Engineering Practice Innovation Project [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.
- LU J Q. EPIP vocational education teaching model: transforming our learning [M]. Beijing: Higher Education Press, 2019.
- LU J Q. EPIP teaching model: a discourse system for vocational education in China [M]. Tianjin: Tianjin People's Publishing House, 2019.
- LU J Q. Interpretation of Engineering Practice Innovation Project (EPIP) [M]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2021.
- LU J Q. Research on Luban Workshop : origin, essentials, standards and strategies: a collection of selected papers on Luban Workshop by Lii Jingquan [M]. Beijing:China Railway Publishing House Co., Ltd., 2022.

Information about authors

Muzdybayeva A. – candidate of technical sciences, Associate Professor D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: amuzdybaeva@mail.ru, +77772711625

Mashekenova A. – candidate of technical sciences, Member of the Board - Vice-Rector for Academic Affairs, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: assiia173@mail.ru +7 7771397141

Rogovsky V. – senior lecturer, D.Serikbayev EKTU, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: gerat1302@mail.ru

Yakovlev V. – senior lecturer, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: vel1051@yandex.ru

Mukhamedova A. – senior lecturer, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: m_amina1711@mail.ru

ПАЙДАЛЫ ҚАЗБАЛАРДЫ БАЙЫТУ
ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ
MINERAL PROCESSING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_39
MFTAA 622.75/.77

**Р.А. Рамазанова¹, Н. Шәймәрдан¹, Б.С. Саурбаева¹,
Б.С. Тантайбаева², С.В. Мамяченков³**

¹Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан
E-mail: raigul_77_33@mail.ru
E-mail: Nurjan2010@mail.ru*
E-mail: saurbaeva71@mail.ru

²С. Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен қ., Қазақстан
E-mail: bati_54@mail.ru

³Ресейдің тұңғыш президенті Б.Н. Ельцин атындағы Урал федералдық университеті,
Екатеринбург қ., Ресей
E-mail: svmtamyachenkov@yandex.ru

**ЖӘЙРЕМ КЕН ОРНЫНЫҢ ТОТЫҚҚАН ҚОРҒАСЫН-МЫРЫШ КЕНІНІҢ
ЗАТТЫҚ ҚҰРАМЫ МЕН БАЙЫТЫЛУЫН ЗЕРТТЕУ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА И ОБОГАТИМОСТИ
ОКИСЛЕННОЙ СВИНЦОВО-ЦИНКОВОЙ РУДЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖАЙРЕМ**

**STUDY OF THE MATERIAL COMPOSITION AND ENRICHMENT
OF OXIDIZED LEAD-ZINC ORE OF THE ZHAIREM DEPOSIT**

Аңдатпа. Бұл мақалада Жәйрем кен орнының тотыққан қорғасын-мырыш кенінің заттық құрамы мен байытылуын зерттеу нәтижелері келтірілген. Бұл зерттеу Жәйрем кен орнындағы тотыққан қорғасын-мырыш кенінің қасиеттерін тереңірек түсінуге және оны ұтымды пайдалану бойынша ұсыныстар әзірлеуге бағытталған. Өнеркәсіптің әртүрлі салаларында қорғасын мен мырыш тұтынудың тұрақты өсуіне байланысты соңғы уақытта қорғасын-мырыш кенін өндіру мен өңдеуге сұраныстың айтарлықтай артуы байқалады. Қорғасынның 80 %-ға жуығы қорғасын-қышқылды аккумуляторлар өндірісінде, ал мырыштың шамамен 50 %-ы болатты гальванизацияда және 30 %-дан астамы мырыш қорытпаларын, соның ішінде жез бен қоланы өндіруде қолданылады. Қазақстан Республикасындағы барланған, бірақ әлі игерілмеген кен орындары осы кенді өндіру мен өңдеуді ұлғайту үшін әлеует тудырады. Кенді ұтымды пайдалану мүмкіндіктерін зерттеу шеңберінде келесі нәтижелер алынды. Зерттелетін кенді ауыр сұйықтықта байыту барысында ортаның тығыздығы 2,40-2,45 г/см³ болған кезде 90,84 % шығымы бар, құрамында 1,56 % қорғасын және 6,12 % мырышы бар ауыр фракция түзілетіні, аталған металдарды бөліп алу сәйкесінше 99,4 % және 99,7 % екені анықталды. Осы жағдайларда бөлінетін жеңіл фракция бастапқы материалдың массасының 21,92 % құрайды және құрамында 0,16 % қорғасын мен 0,22 % мырыш бар, 2,65 % және 0,97 % қалпына келтіріледі. Тығыздығы 2,20–2,25 г/см³ ауыр суспензияда байыту кезінде мынадай өнімдер алынды: құрамында 1,93 % қорғасын және 7,40 % мырыш бар 71,80 % шығымды бар ауыр фракция (96,4 % және 98,7 % бөліп алу), сондай-ақ құрамында 0,18 % қорғасын және 0,24 % мырышы бар 28,16 % шығымды жеңіл фракция (сәйкесінше бөліп алу 3,55 % және 1,28 %).

Зерттеу нәтижелері зерттелетін кеннен мырыш пен қорғасынды селективті алу үшін ауыр ортада байыту әдісін қолданудың жоғары тиімділігін көрсетеді.

Түйін сөздер: заттық құрам, қорғасын-мырыш кені, ауыр сұйықтық, ауыр суспензия, бөліп алу.

Аннотация. В данной статье представлены результаты исследований вещественного состава и обогатимости окисленной свинцово-цинковой руды месторождения Жайрем. Данное исследование направлено на углубленное понимание свойств окисленной свинцово-цинковой руды месторождения Жайрем и разработку рекомендаций по ее рациональному использованию. В связи с устойчивым ростом потребления свинца и цинка в различных отраслях промышленности в последнее время наблюдается значительное увеличение спроса на добычу и переработку свинцово-цинковой руды. Около 80 % свинца используется при производстве

свинцово-кислотных аккумуляторов, в то время как порядка 50 % цинка расходуется на стальные гальванические покрытия, а свыше 30 % – на производство цинковых сплавов, в том числе латуни и бронзы. Разведанные, но еще не освоенные месторождения в Республике Казахстан создают потенциал для наращивания добычи и переработки данной руды. В рамках изучения возможностей рационального использования руды были получены следующие результаты. В ходе проведения обогащения исследуемой руды в тяжелой жидкости установлено, что при плотности среды 2,40-2,45 г/см³ формируется тяжелая фракция с выходом 90,84 %, содержащая 1,56 % свинца и 6,12 % цинка, при извлечении указанных металлов 99,4 % и 99,7 % соответственно. Легкая фракция, выделяющаяся при этих условиях, составляет 21,92 % от массы исходного материала и характеризуется содержанием свинца 0,16 % и цинка 0,22 %, с извлечением 2,65 % и 0,97 %. При обогащении в тяжелой суспензии с плотностью 2,20-2,25 г/см³ получены следующие продукты: тяжелая фракция с выходом 71,80 %, содержащая 1,93 % свинца и 7,40 % цинка (извлечение 96,4 % и 98,7 %), а также легкая фракция с выходом 28,16 %, содержащая 0,18 % свинца и 0,24 % цинка (извлечение 3,55 % и 1,28 % соответственно).

Результаты исследований свидетельствуют о высокой эффективности применения метода обогащения в тяжелых средах для селективного извлечения цинка и свинца из исследуемой руды.

Ключевые слова: вещественный состав, свинцово-цинковая руда, тяжелая жидкость, тяжелая суспензия, извлечение.

Annotation. This article presents the results of studies of the material composition and enrichment of oxidized lead-zinc ore from the Zhairam deposit. This study is aimed at gaining a deeper understanding of the properties of oxidized lead-zinc ore from the Zhairam deposit and developing recommendations for its rational use. Due to the steady growth in lead and zinc consumption in various industries, there has recently been a significant increase in demand for lead-zinc ore mining and processing. About 80% of lead is used in the production of lead-acid batteries, while about 50% of zinc is used in steel electroplating and over 30% is used in the production of zinc alloys, including brass and bronze. Explored but not yet developed deposits in the Republic of Kazakhstan create potential for increasing the extraction and processing of this ore. The following results were obtained in the study of the possibilities of rational use of ore. During the enrichment of the studied ore in a heavy liquid, it was established that at a medium density of 2.40–2.45 g/cm³, a heavy fraction is formed with a yield of 90.84%, containing 1.56% lead and 6.12% zinc, with the extraction of these metals being 99.4% and 99.7%, respectively. The light fraction released under these conditions constitutes 21.92% of the mass of the original material and is characterized by a lead content of 0.16% and zinc of 0.22%, with an extraction of 2.65% and 0.97%. When enriched in a heavy suspension with a density of 2.20–2.25 g/cm³, the following products were obtained: a heavy fraction with a yield of 71.80%, containing 1.93% lead and 7.40% zinc (extraction of 96.4% and 98.7%), as well as a light fraction with a yield of 28.16%, containing 0.18% lead and 0.24% zinc (extraction of 3.55% and 1.28%, respectively).

The results of the research indicate the high efficiency of the use of the enrichment method in heavy media for the selective extraction of zinc and lead from the ore under study.

Keywords: material composition, lead-zinc ore, heavy liquid, heavy suspension, extraction.

Кіріспе. Қазақстанның Ұлытау облысында орналасқан Жәйрем кен орны аймақтағы қорғасын-мырыш кендерінің маңызды көздерінің бірі болып табылады. Түрлі салаларда кеңінен қолданылатын түсті металдарға, әсіресе қорғасын мен мырышқа деген сұраныстың артуын ескере отырып, осы кен орнының тотыққан кенінің заттық құрамы мен байытылуын зерттеу өзекті міндет болып табылады.

Тотыққан кендер, әдетте, пайдалы компоненттердің едәуір мөлшерін қамтиды, бірақ олардың физикалық және химиялық қасиеттері түзілу және кен орнының шарттарына байланысты айтарлықтай өзгеруі мүмкін. Сондықтан минералогиялық құрамын егжей-тегжейлі зерттеу, сонымен қатар кеннің байытылуын бағалау металдарды өңдеу мен бөліп алудың тиімді технологияларын жасаудың негізгі кезеңдері болып табылады.

Бұл зерттеу тотыққан қорғасын-мырыш кенінің химиялық құрамын талдауды және оны заманауи әдістермен байытуды бағалауды қамтиды. Бұл кеннің құрамындағы негізгі пайдалы қазбаларды анықтап қана қоймай, оны өңдеудің оңтайлы шарттарын анықтауға мүмкіндік береді.

Осылайша, бұл зерттеу Жәйрем кен орнындағы тотыққан қорғасын-мырыш кенінің заттық қасиеттерін тереңірек білуге және оны ұтымды пайдалану бойынша ұсыныстар әзірлеуге бағытталған, бұл өз кезегінде өңірдегі тау-кен өнеркәсібінің тұрақты дамуына ықпал етеді.

Зерттеу нәтижелерін технологиялық байыту процестерін оңтайландыру және пайдалы қазбаларды өндіру тиімділігін арттыру үшін пайдалануға болады.

Әдеби шолу. Қорғасын-мырыш кенін өндіру мен өңдеуге деген қажеттілік соңғы жылдары өнеркәсіптің әртүрлі салаларында қорғасын мен мырыштың үнемі өсуіне байланысты айтарлықтай ұлғайып келеді. Қорғасын қышқылды аккумуляторлардың өзі қорғасынды тұтынудың шамамен 80 % құрайды, ал болат гальванизация мырыш тұтынудың шамамен 50 % құрайды, 30 %-дан астамы мырыш қорытпаларының өндірісіне, соның ішінде жез және қола жасау үшін пайдаланылады. Барланған, бірақ игерілмеген кен орындарының едәуір санының болуы Қазақстан Республикасына қорғасын-мырыш кендерін өндіру мен өңдеуді дамытуға мүмкіндік береді.

Қазіргі уақытта полиметалл рудалары қорғасын мен мырыш өндірудің негізгі шикізаты болып табылады. Өндіріс технологиясы бастапқы кендік шикізатты флотациялық байытуды, содан кейін алынған концентраттарды пирометаллургиялық немесе гидрометаллургиялық өңдеуді қамтиды. Өкінішке орай, жақсы байытылған сульфидті кендердің қоры азайып келеді, бұл өндіріске аралас және тотыққан кендерді тарту қажеттілігіне әкеліп соғады.

Соңғы жылдардағы ғылыми әдебиеттерді талдау қиын байытылатын аралас және тотыққан кендерді байыту мәселелеріне зерттеушілердің айтарлықтай көңіл бөлгенін көрсетеді және бұл келесі авторлардың еңбектерімен расталады.

Бұл мақалада мырыш қорының жалпы көлемі Қазақстан Республикасындағы барлық қорлардың 30 %-дан астамын құрайтын және дүние жүзінде бесінші орын алатын Шалқия кен орнындағы қорғасын-мырыш кендерінің материалдық құрамын зерттеу нәтижелері берілген. Дәлелденген және болжамды қоры JORC классификациясы бойынша мырыштың 6,5 миллион тоннасын құрайды.

Авторлардың алынған нәтижелері бойынша бос бөлшектердегі галениттің үлесі 47,42 %, сфалерит – 39,52 % құрайды. Галенит пен сфалерит бөлшектерінің өлшемдері сәйкесінше 5 және 10 мкм-ден аз, бұл гравитациялық әдіспен бөлінудің перспективтілігін көрсетеді, бұл спиральды сепараторда байыту кезінде расталды. Материалдың құрамын талдау осы Шалқия кен орнының кендері байытылуы қиын кендер санатына жататынын көрсетті (Yushina et al., 2022).

Тотыққан шикізатты кешенді өңдеу дәрежесін арттыру үшін шикізатқа деген көзқарасты өзгерту және жаңа принциптерге негізделген өнеркәсіптік технологияларды құру қажет екендігін аңғаруға болады. Бұл мақалада шикізатқа жаңа көзқарас пен шикізатты кешенді өңдеу деңгейін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік беретін жаңа тиімді технологияларға негізделген тотыққан мыс-мырыш оксиді кендерін кешенді өңдеу бойынша теориялық және қолданбалы зерттеулердің нәтижелері берілген. Әмбебап технологиялық шикізат идеологиясына негізделген оксидті, мырыш пен тотыққан мыс кендерін кешенді өңдеудің жаңа әдістерінің теориялық заңдылықтары, ерекшеліктері мен оңтайлы технологиялық параметрлері және бір пеш қондырғысында бірнеше өнімді бір мезгілде өндіру анықталған (Shevko et al., 2021).

Келесі жұмыстың авторлары тотыққан қорғасын-мырыш кенін өңдеу технологиясы мен әдісін, оның ішінде тотыққан қорғасын және мырыш қосылыстарының жоғары температурада сульфидтендіргіш күйдіруін, пирит түріндегі күкіртті жоғары күкіртті заттың қатысуымен жүргізілген металл оксидінің пиритке молярлық қатынасы кезінде 0,1-0,14 сульфидтеу үшін 750-800 °C температурада және ұзақтығы 30-45 минутта 10-20 л/мин ағынмен ауа үрлейтін сұйық қабатты пеште күйдіру нәтижелерін ұсынды (күкірттің мөлшері 45,15 %). Күкіртті күйдіру нәтижесінде сульфидтену дәрежесі 88 %-ға жетті, ал кейіннен ашық флотация циклінде мырышты магнитті емес фракциядан көбік өніміне алу 23,4 % мырыш мөлшерімен 90 % құрады (Chepushtanova et al., 2023).

Келесі жұмыс қиын байытылған тотыққан қорғасын кендерін флотацияға дайындаудың жаңа тәсілін ұсынған. Ұсынылған әдіс сол кен орнының ұсақ түйіршікті қорғасын-мырыш сульфидті кені бар Озерное (Батыс Забайкалье, Ресей) полиметалл кен орнының тотыққан қорғасын кендерін бірлесіп күйдіруге және кальций оксидін қосуға негізделген. Бұл әдіс минералды кешендерді белсендіруге, тотыққан қорғасын-мырыш минералдарын сульфидтенуге және бөлінген газ тәрізді күкірт диоксидінің мөлшерін азайтуға мүмкіндік береді. 650-700 °C температурада тотыққан қорғасын-мырыш рудасын сульфидті кенмен (мас. 10-30 %) біріктіріп күйдіру пириттің таңдамалы тотығуына және тотыққан қорғасын мен мырыш минералдарының сульфидтенуіне әкелетіні көрсетілді (Antropova et al., 2024). Полиметалл кендерін өңдеудің ұсынылып отырған әдісі тек тотыққан қорғасын-мырыш кендерін ғана емес, сонымен қатар отқа төзімді сульфидті кендерді бір мезгілде өңдеуге мүмкіндік береді, сол арқылы тау-кен кәсіпорнының қызмет ету мерзімін ұзартады және қоршаған ортаға әсерін азайтады.

Келесі зерттеуде авторлар флотация әдісімен әртүрлі сынақ жағдайында әртүрлі химиялық реагенттерді пайдалана отырып қорғасын-мырыш оксиді-карбонатты кендерді алу технологиясын ұсынған. Өндірістен алынған оксид-карбонатты қорғасын-мырыш кенінің құрамында 9,05 % қорғасын және 11,97 % мырыш бар, смитсонит пен церуссит басым. Бірінші эксперименттік жұмыс барысында 106 мкм-ден аз фракцияларды 15 минуттан екі кезеңде азайту үшін ұсақтау сынақтары жүргізілген. Алдын ала флотация сынақтары Pb үшін ұқсас нәтижелер берді, бірақ pH, ZnSO₄, CuSO₄ немесе AERO 3477, 3501 және 8651 сияқты коллекторлар Zn экстракциясына оң әсер еткен жоқ. Сондықтан зерттеудің негізгі бағыты КМЦ, Na₂S, AERO промоторы сияқты қолданылатын химиялық заттардың мөлшерін өзгерту арқылы Pb концентратын алу болған. 350 г/т КАХ, 275 г/т AERO 407, 7500 г/т Na₂S, 1000 г/т КМЦ қолданатын флотацияның алты кезеңінен кейін 71,56 % қалпына келтірумен 70,93 % Pb концентрациясына қол жеткізілген. Мырыштың 91,51 %-ы 14,66 % Zn болатын қалдықтарда қалған (Mütevellioglu et al., 2019).

Қиын байытылған мырыш кендерін өңдеу мәселесін шешу үшін біз тотыққан мырыш кендерін ерітінділеудің принципті жаңа тәсілін ұсынғанымызды атап өткен жөн, ол мырыштың жоғары мөлшерін кенді сульфат ерітіндісіне тиімді бөліп алуға мүмкіндік береді (Ramazanova et al., 2023). Сондай ақ біз тотыққан мырыш минералдары үшін термодинамикалық есептеулер жасадық және олардың реактивті белсенділігіне салыстырмалы талдау жүргіздік (Ramazanova et al., 2021), каламиннен мырышты бөліп алудың кинетикасының процестерін күкірт қышқылымен ерітінділеу әдісімен зерттеу жүргіздік (Ramazanova et al., 2021), күкірт қышқылын қолдана отырып, смитсониттен мырышты ерітінділеудің кинетикалық заңдылықтарын зерттедік (Ramazanova et al., 2021).

Бұл жұмыста Жәйрем кен орнының тотыққан қорғасын-мырыш кенінің заттық құрамы мен байыту ерекшеліктері қарастырылған. Ауыр сұйық және ауыр суспензияны қолдану арқылы кен байыту бойынша тәжірибелер жүргізілді. Алынған нәтижелер осы кеннен мырыш пен қорғасынды бөліп алу үшін ауыр орталарда байыту әдістерін қолданудың жоғары тиімділігін растайды.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Бұл жұмыста зерттеу объектісі салмағы 300 кг Жәйрем кен орнының (Ұлытау облысы, Қазақстан) тотыққан қорғасын-мырыш өзек кенінің өкілді партиясы болды. Кендегі пайдалы компоненттердің мөлшері Zn 6,7 %, Pb 2,1 %, Ag 38,2 г/тн, BaSO₄ 17 % құрады.

Материалдың құрамын зерттеу үшін араластыру және сынама алу, гранулометриялық талдау жүргізу, физикалық-химиялық қасиеттерін анықтау, сондай-ақ гравитациялық және флотациялық әдістерді қолдану арқылы байытуды зерттеуді қамтитын кеннің технологиялық үлгісі зерттеуге дайындалды (Руды и концентраты 2010, Свинцовые и цинковые руды 2007).

Қорғасын, мырыш, мыс, темір, кремний диоксиді, жалпы күкірт және көміртектің тығыздық фракциялары бойынша таралу заңдылықтары (тығыздық диапазоны $>2,80$ г/см³-ден $<2,20$ г/см³-ге дейін) және гранулометриялық кластары ($-25+5$ мм, $-10+5$ мм, $-2+12$ мм, $-2+12$ мм) анықталды.

1-кестеде Жәйрем кен орнының тотыққан қорғасын-мырыш кенінің үлгісінің химиялық талдауы көрсетілген.

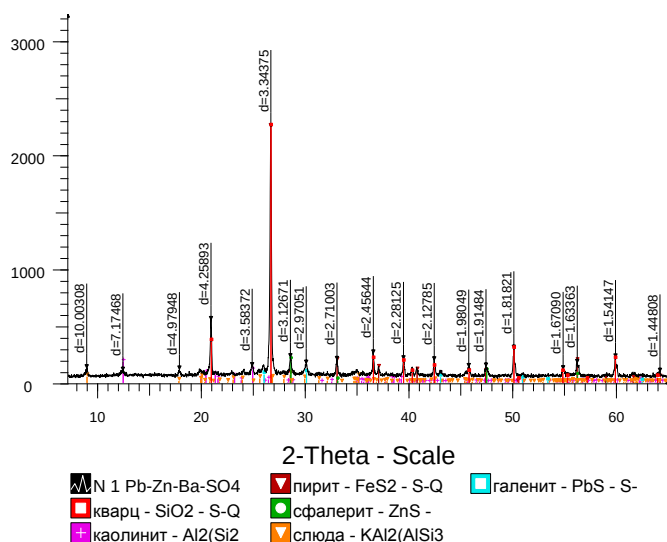
1-кесте. Жәйрем кен орнының тотыққан қорғасын-мырыш кенінің сынамасының химиялық құрамы

Өнімнің атауы	Мөлшері, %						Мөлшері, г/т	
	Pb	Zn	Cu	Fe	S _{жалп.}	C _{жалп.}	Au	Ag
Бастапқы кен	1,46	5,65	0,06	8,07	10,72	1,12	0,05	30,2
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>								

Рационалды талдау нәтижелері бойынша бастапқы кен үлгісіндегі металдардың тотыққан және қиын байытылатын түрлерінің мөлшері: мырыш – 12,50 %, қорғасын – 14,35 %, мыс – 54,90 % екені анықталды. Сондай-ақ зерттелетін кеннің физикалық сипаттамалары, оның ішінде шынайы және көлемдік тығыздығы, кеуектілігі, ылғалдылығы, Протодьяконов шкаласы бойынша беріктік коэффициенті анықталды.

Жүргізілген зерттеулер нәтижесінде Жәйрем кен орны кенінің келесі физикалық сипаттамалары анықталды: шынайы тығыздығы 2,93 г/см³; $-25+0$ мм сыныбына дейін ұсақталған үлгінің көлемдік тығыздығы 1,38 г/см³, ал $-2+0$ мм сыныбына дейін ұсақталған үлгі үшін 1,58 г/см³. Кеннің кеуектілігі 52,9%, ылғалдылығы 3,1 %. М.М. сәйкес беріктік коэффициенті. масштаб. Протодьяконов XV–XVI санаттарға сәйкес келеді.

Зерттелетін кеннің рентгендік фазалық талдауы «ҚР КІМС ҰК» РМК ВНИИТцветмет филиалында D8 ADVANCE дифрактометрінің (Германия) көмегімен жүргізілді. Бұл талдаудың нәтижелері 1-суретте берілген. Дифракциялық үлгілерді интерпретациялау ICDD файлындағы деректерді пайдалану арқылы жүзеге асырылды: ұнтақ дифракциялық деректер базасы PDF2 (Powder Diffraction File) және қоспасыз минералдардың дифракциялық үлгілері.

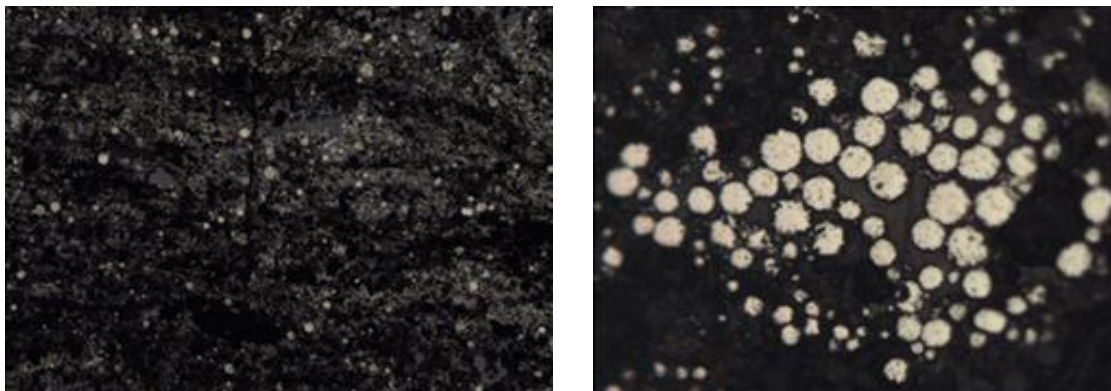


1-сурет. Қорғасын-мырыш-барит кені үлгісінің дифракциялық үлгісі

Ескерту – автормен құрастырылған

Бастапқы кеннің иммерсиялық талдауы «ҚР КПМС ҰК» РМК ВНИИТцветмет филиалында жүргізілді. Мырыш минералдары мен басқа да кен минералдарын анықтау OLYMPUS BX 51 Pol микроскопы, SIMAGIS 2P-2C бейнекамера және SIAMS (Жапония) компаниясының Mineral C7 кескінді талдау бағдарламалық құралы арқылы жылтыратылған кен учаскелерінде шағылысқан жарықта жүргізілді.

Бастапқы кеннің иммерсиялық талдауының нәтижелері 2-суретте келтірілген.



2-сурет. Кен сынамасының аншлифтері

Ескерту – автормен құрастырылған

Негізгі жыныстар қара әкті-көміртекті, сұр және ашық сұр массивті кремнийлі-әкті алевролиттердің қабаттарының біркелкі емес немесе ырғақты кезектесуімен сипатталады. Қабаттардың қалыңдығы 0,5 мм-ден 5 см-ге дейін өзгереді. Кендердің текстурасы негізінен жұқа қабатты, біркелкі емес немесе ырғақты қабаттанған, бұл литологиялық және минералогиялық құрамы әртүрлі қабаттардың кезектесіп тұруымен байланысты.

Бастапқы кеннің иммерсиялық талдауының нәтижелері бойынша негізгі кендік минералдар пирит, сфалерит және галенит, ал бейметалл минералдар – кальцит, кварц, гидрослюда минералдары, көміртекті заттар.

Тотыққан қорғасын-мырыш кенін байытуды зерттеу. -25+5 мм және -10+5 мм сияқты ірі кен сорттарының гравитациялық концентрациясы ауыр суспензия мен ауыр сұйықтықты қолдану арқылы бағаланды. Аталған кластардың кен сынамаларын стратификациялау процесі тығыздығы диапазоны: 2,20 г/см³, 2,25 г/см³, 2,30 г/см³, 2,35 г/см³, 2,40 г/см³, 2,45 г/см³, 2,50 г/см³ кем жеңіл және ауыр фракцияларды қоса алғанда, суспензияның әртүрлі тығыздығы бар фракцияларда жүзеге асырылды, 2,55 г/см³, 2,60 г/см³ және 2,65 г/см³. Бөлу тығыздығының мәндері арасындағы аралық 0,05 г/см³ болды.

Ауыр суспензияны қолдана отырып, кен сынамасын байытуға бағытталған зертханалық зерттеулер мехведро деп аталатын суспензияны механикалық араластыру құрылғысымен жабдықталған аппаратта жүргізілді. Бұл құрылғының жұмыс көлемі 5 дм³ құрайды.

Мехведрадағы кен сынамасын байыту процесі келесідей жүргізілді: берілген тығыздығы бар суспензия аппаратқа құйылады, содан кейін 500 г мөлшерінде кен тиеледі, тиелетін кеннің көлемі суспензия көлеміне және өңделетін кеннің көлеміне байланысты анықталады. Бұл әдістеме гравитациялық байыту технологиясының маңызды аспектісі болып табылатын тығыз фракциялар бойынша минералдардың бөліну процестерін тиімді зерттеуге мүмкіндік береді.

Суспензия қарқынды араластыруға ұшырайды, содан кейін араластыру тоқтайды және 5-10 секундтан кейін қалқымалы фракция торлы түбімен жабдықталған шөмішпен шығарылады. Алынған фракция кеннен ағып жатқан суспензияны жинау үшін шелектің

үстінде орналасқан торға ауыстырылады. Осыдан кейін суспензияны араластыру қайта басталады. Жеңіл фракцияны іріктеу кезінде шөміш суспензияға ең үлкен кен бөлігінің мөлшеріне тең тереңдікке батырылады.

Тығыздығы мен ірілігі бойынша бөлініп алынған фракциялар ауыр суспензия мен ауыр сұйықтықтың қалдықтарынан жуылғаннан кейін кептіріледі, ұсақталады және ұнтақталады. Бұл процедуралар химиялық талдаулар жүргізу үшін қолданылатын сынамаларды дайындау үшін қажет. Бұл әдістеме таза және біртекті үлгілерді алуды қамтамасыз етеді, бұл кейінгі аналитикалық зерттеулер үшін өте маңызды.

Ұсынылған бөлу әдісі өте сенімді және алынған технологиялық көрсеткіштер практикалық жағдайда алынған нәтижелерге жоғары сәйкестік дәрежесін көрсетеді.

Оңтайлы жағдайларда руда сынамасының гравитациялық байытылуын бағалау $BaI_2 + CdI_2$ ($BaCdI_4$) тұратын, меншікті салмағы $2,95-3,0 \text{ г/см}^3$ диапазонындағы ауыр металл тұздарының концентрацияланған сулы ерітіндісі болып табылатын М-45 ауыр сұйықтықты пайдалана отырып жүргізілді. Бұл әдістеме кенді байыту әлеуетін тиімді бағалауға мүмкіндік береді, бұл гравитациялық байыту технологияларын әзірлеу процесінің маңызды кезеңі болып табылады.

Ауыр сұйықтықты пайдалана отырып, кен сынамасын байытуға бағытталған зертханалық зерттеулер көлемі 5 дм^3 шыны ыдыста жүргізілді. Контейнерге тығыздығы $3,0 \text{ г/см}^3$ болатын екі литр ауыр сұйықтық ерітіндісі құйылды. Осыдан кейін ауыр сұйықтық қатты араластырылды, содан кейін оған зерттелетін кен сынамасының ілмегі қосылды және араластыру процесі кем дегенде 10 секундқа созылды. Араластыру және кейіннен тұндыру аяқталғаннан кейін жүйеде минералдардың бөлінуі болды: жеңіл минералдар бетіне көтерілді, ал ауыр минералдар ыдыстың түбіне қоныстанды.

Минералды қоспаның бөлінуі нәтижесінде минералдардың жеңіл және ауыр фракциялары түзіледі. Қалқымалы жеңіл фракциялар торлы түбімен жабдықталған шөмішпен мұқият алынып тасталады және кеннен ағып жатқан сұйықтықты жинау үшін қосалқы шыны ыдыстың үстінде орналасқан елекке ауыстырылады.

Берілген тығыздығы бар ерітінді ($3,0 \text{ г/см}^3$ -ден аз) ауыр сұйықтыққа біртіндеп су қосу арқылы дайындалды. Бөлу тығыздығы арасындағы аралық $0,05 \text{ г/см}^3$ болды. Су қосудың әр кезеңінен кейін қоспасы қайта араластырылды, ауыр сұйықтықтың тығыздығы өлшенді және қажетті мәнге жеткенде байыту процесі бұрын айтылған әдістемеге сәйкес жалғасты.

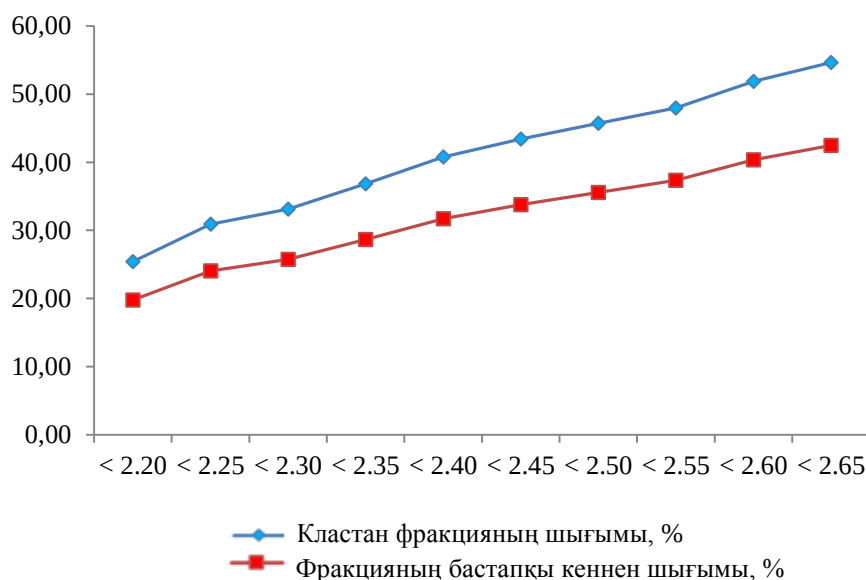
Фракцияларды ауыр сұйықтықтан бөлу сүзу әдісімен жүзеге асырылды, содан кейін олар жуылып, кептірілді. Сүзуден кейін қалған ауыр сұйықтық одан әрі бөлу операциялары үшін қайта пайдаланылды. Жуу сулары $3,0 \text{ г/см}^3$ тығыздыққа жеткенше буланған.

Нәтижелер және оларды талқылау. $-25+5$ мм ірі класы бар ауыр суспензиялардағы кен сынамасын гравитациялық байыту кезінде тығыздығы $2,20 \text{ г/см}^3$ -тен аз болған кезде бөлінетін ең жеңіл фракцияның шығымы байыту өнімінің массасының $25,43 \%$ және кеннің бастапқы массасының $19,79 \%$ құрады.

Ауыр суспензияның тығыздығы $2,20$ -дан $2,65 \text{ г/см}^3$ ($0,05 \text{ г/см}^3$ қадаммен) диапазонында ұлғайған кезде байыту өнімінің массасынан жеңіл фракцияның шығуының дәйекті өсуі байқалады: $2,20 \text{ г/см}^3$ тығыздықта $25,43 \%$ -дан $2,65 \text{ г/см}^3$ тығыздықта $54,62 \%$ -ға дейін. Мәндер: $25,43 \%$, $30,93 \%$, $33,10 \%$, $36,83 \%$, $40,79 \%$, $43,43 \%$, $45,73 \%$, $47,99 \%$, $51,86 \%$ және сәйкесінше $54,62 \%$. Зерттелетін кен сынамасын байыту кезінде жеңіл фракцияның шығуының (байыту өніміне де, кеннің бастапқы массасына да) ауыр суспензияның тығыздығына тәуелділігі 3-суретте көрсетілген.

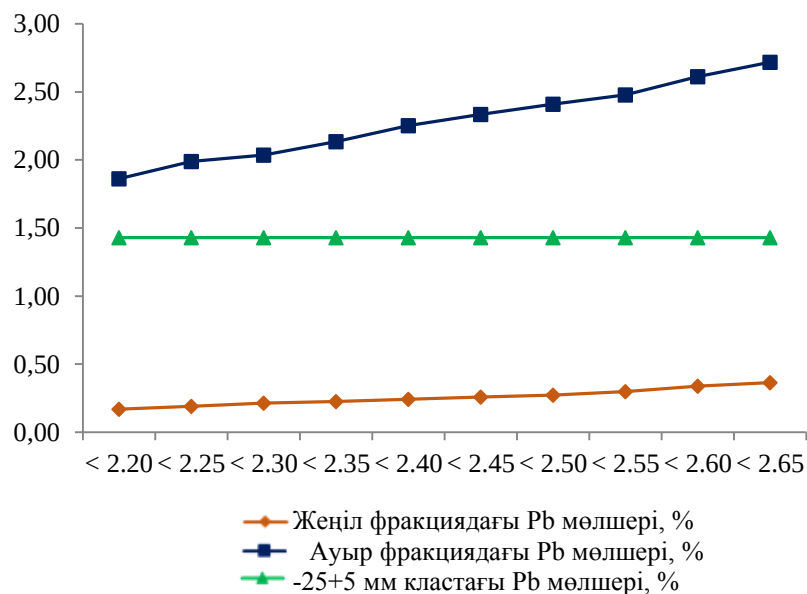
$-25+5$ мм өлшемді материалды байытқан кезде $2,20 \text{ г/см}^3$ ауыр суспензия тығыздығында мырыштың $0,20 \%$ ең аз шығыны тіркелді. Бұл жағдайда жеңіл фракцияның

шығымы байыту өнімінің массасының 25,43 % және бастапқы кен массасының 19,79 % құрады. Бұл тығыздықта жеңіл фракциямен мырыштың салыстырмалы жоғалуы 0,95 % құрады.



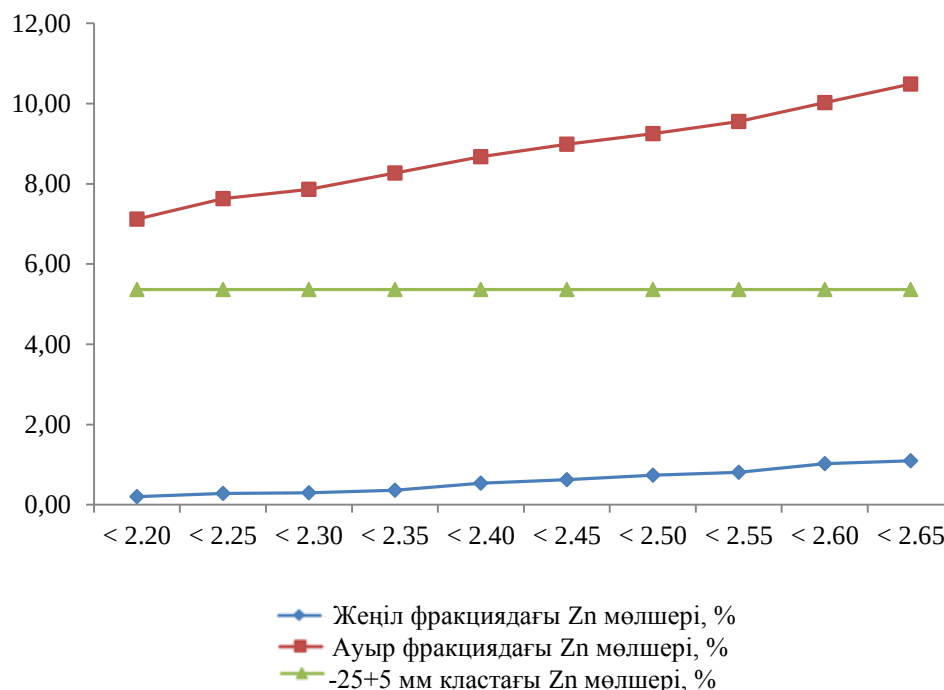
3-сурет. Ауыр суспензияда тотыққан қорғасын-мырыш кені сынамасының сынамасын байыту кезіндегі жеңіл фракцияның шығу динамикасы – 25+5 мм
Ескерту – автормен құрастырылған

Ең жеңіл фракциядағы қорғасын мөлшері (4-сурет) тығыздығы 2,20 г/см³ болған кезде – 0,17 % құрады, ал жеңіл фракцияға қорғасын алу – 3,02 % құрады.



4-сурет. Тотыққан қорғасын-мырыш кенінің -25+5 мм сынамасында ауыр суспензиясының тығыздығына байланысты қорғасынның таралуы
Ескерту – автормен құрастырылған

Ауыр суспензияның тығыздығының жоғарылауымен жеңіл фракцияның шығымы және мырыш шығыны артады (5-сурет). Ауыр суспензияның ең жоғары тығыздығы кезінде – 2,65 г/см³, жеңіл фракциядағы мырыштың мөлшері 1,09 %, экстракция 11,16 % құрады.



5-сурет. Тотыққан қорғасын-мырыш кенінің 25+5 мм сынамасында ауыр суспензиясының тығыздығына байланысты мырыштың таралуы

Ескерту – автормен құрастырылған

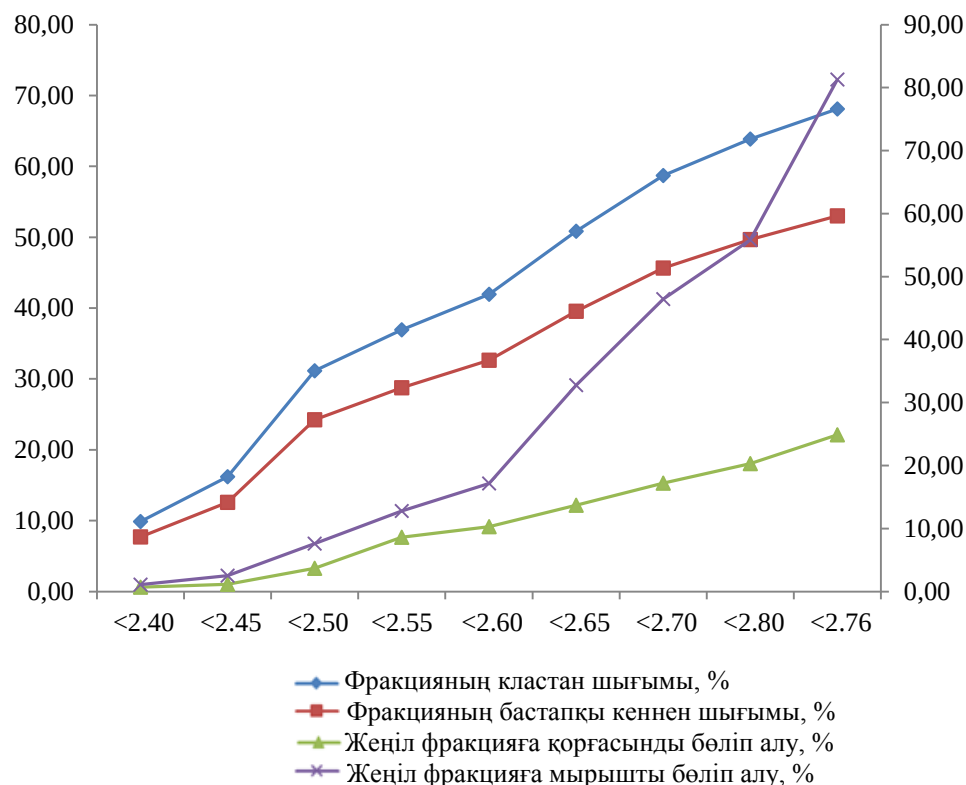
Тығыздығы 2,20 г/см³-ден аз болған кезде жеңіл фракция шығымы 25,43 % (кеннің 19,79 %) құрамында темірдің – жалпы күкірт пен көміртегінің мөлшері: сәйкесінше 1,75 % – 1,93 % және 0,84 % құрады. Бөлу ортасының тығыздығының жоғарылауымен жеңіл фракциядағы жоғарыда аталған металдардың шығымы мен мөлшері артады.

Бастапқы кен үлгісінде -25+5 мм класты шығымдылық 77,79 % құрады. Бастапқы кен үлгісіне қатысты кеннен жеңіл фракцияның келесі шығымы алынды: 19,79 - 24,06 - 25,75 - 28,65 - 31,73 - 33,79 - 35,58 - 37,33 - 40,35 - 42,49 %, суспензия, тиісінше аз, тығыздық: 2,20 - 2,25 - 2,30 - 2,35 - 2,40 - 2,45 - 2,50 - 2,55 - 2,60 және 2,65 г/см³ жоғары.

Ауыр сұйықтықтағы байыту нәтижелері. Гравитациялық байыту нәтижелерін талдау негізінде -25+5 мм ірі класс үшін қолайлы жағдайларда бөлу ортасының тығыздығы 2,40 г/см³-тен аз болған кезде ең жеңіл фракцияның шығымы байыту өнімінің массасының 9,89 % құрайтыны анықталды. Бұл фракциядағы металдардың құрамы: қорғасын – 0,07 %, мырыш – 0,11%. Ауыр сұйықтықтың тығыздығы 2,40-тан 2,65 г/см³-ке дейін ұлғайған кезде жеңіл фракция шығымының табиғи өсуі байқалады – 9,89 %-дан 50,84 %-ға дейін. Тиісінше, жеңіл фракциясы бар металдардың жоғалу деңгейі де артады: қорғасын – 0,07 %-дан 0,27 %-ға дейін, мырыш – 0,11 %-дан 0,64 %-ға дейін.

Айта кету керек, жеңіл фракцияның шығымы артқан сайын зерттелетін барлық компоненттердің – қорғасын, мырыш, жалпы темір, күкірт және көміртектің жоғарылау тенденциясы байқалады.

Ауыр сұйықтықтағы сынамаларды бөлу кезінде байыту нәтижелері ауыр суспензиядағы байыту нәтижелеріне карағанда айтарлықтай ерекшеленеді (6-сурет).



6-сурет. Ауыр сұйықтықта тотыққан қорғасын-мырыш кенінің -25+5 мм класс бойынша сынамасын байыту нәтижелері

Ескерту – автормен құрастырылған

Тотыққан қорғасын-мырыш кені сынамасын гравитациялық байыту кезінде ауыр суспензияның ең аз пайдаланылған тығыздығы $2,40 \text{ г/см}^3$ құрады. Бұл тығыздықта жеңіл фракцияның шығымы байыту өнімінің массасының $9,89 \%$ құрады (бұл бастапқы кен массасының $16,18 \%$ -на сәйкес келеді), оның құрамында қорғасын – $0,07 \%$ (кеннен – $0,07 \%$) және мырыш – $0,11 \%$ (кеннен – $0,16 \%$).

Бастапқы кеннің массасына қатысты жеңіл фракцияның салыстырмалы шығымы суспензия тығыздығының жоғарылауымен өсті: тығыздығы аз $2,40; 2,45; 2,50; 2,55; 2,60; 2,65; 2,70; 2,75$ және ол сәйкесінше $2,80 \text{ г/см}^3$ -тен асады $7,69 \%, 12,58 \%, 24,23 \%, 28,73 \%, 32,62 \%, 39,55\%, 45,67 \%, 49,68 \%$ және $52,99 \%$.

Ауыр фракцияның минералогиялық талдауының нәтижелері. Зерттелетін үлгідегі ұсақталған материал гранулометриялық құрамның жоғары біркелкі еместігімен сипатталады. Минералды құрамы мен өсінділерінің табиғаты бойынша ірі өлшемді фракция бастапқы рудамен де, ұсақ дисперсті фракциямен де салыстырылады.

Ауыр фракцияның құрамында сульфидті минералдануы нашар кедей жыныстардың сынықтарымен ұсынылған жеңіл фракцияның қосындылары табылды. Соңғысы сирек-жұқа және ұсақ кристалды пириттің, сондай-ақ кейбір жағдайларда сфалериттің шашыраңқы таралуымен сипатталады. Жеңіл фракцияның қосылу деректері байыту процесінде ауыр материалмен механикалық түрде ұсталуы мүмкін деп болжануда.

Тау жыныстарында пирит пен сфалериттің біркелкі емес қосындыларымен сипатталатын пирит пен колчеданды-мырыш өсінділері, ал сирек жағдайда галена. Кейбір жағдайларда металл емес минералдар мен бағынышты галена қосындылары бар қатты пирит және сфалерит-пирит агрегаттары кездеседі.

Көбінесе галенаның және металл емес минералдардың ұсақ қосындыларымен байланысты әртүрлі өлшемдегі және құрылымдардағы пирит қосындылары бар сфалерит бөлшектері айтарлықтай мөлшерде байқалады.

Сондай-ақ, пирит қосындылары жиі кездесетін галена мен сфалериттің қиын бөлінетін субграфикалық өсінділерімен ұсынылған галена құрамының өзара өсінділері атап өтіледі. Кейбір жағдайларда сфалеритте металл емес компоненттердің қосындылары бар галенаның кішігірім ретсіз өсінділері болады.

Көптеген галенит-сфалерит аралық өсінділерде галенит сфалерит үстінде жұқа тоттандырғыш жиектер түрінде дамиды. Негізгі тау жыныстарының бөлшектері, сульфидтердің сирек және біркелкі емес дисперсті қосындылары бар металл емес компоненттер (кварц, барит) – пирит, сфалерит – атап өтіледі.

Жеңіл фракцияның минералогиялық анализінің нәтижелері. Сынамадағы материал негізінен өлшемдері кең ауқымда – 2 мкм-ден 2100 мкм-ге дейін өзгеретін жеңіл фракциялық (бос жыныс) бөлшектерден тұрады.

-25+5 мм класындағы жеңіл фракцияның кейбір бөлшектерінде біркелкі шашыраңқы және қиылысқан сипатқа ие әлсіз сульфидті минералдану байқалады. Бұл бөлшектердегі негізгі минералдар-пирит, сирек-сфалерит, сонымен қатар галенит пен арсенопириттің жалғыз қосындылары бар.

Процестердің сипаттамасы: фрамбоидты пириттің біркелкі емес қабаттасуы бар негізгі жыныстардың бөлшектері басым. Бос жыныста сфалерит пен галенит процестерінің жұқа дақтары бар. Сондай-ақ, пириттің нәзік қосындылары бар сфалерит бөлшектері атап өтілді. Негізгі жыныстардың кремний-карбонатты бөлшектерінде пириттің қосындылары, сондай-ақ галенит пен сфалериттің субграфикалық қосылыстары кездеседі (Абрамов 2005 - Орлов 2004).

Ауыр байытудың зертханалық зерттеулерінің нәтижелері бойынша болжамды теңгерім жасалып, 2-кестеде келтірілген. Ұсынылған баланста жеңіл фракция тек -25+5 мм класынан ерекшеленеді.

2-кесте. Тотыққан қорғасын-мырыш кенінің сынамасын ауыр ортамен байытудың болжамды балансының нәтижелері

Өнімдер	Кеннен шығу, %	Мөлшері, %		Бөліп алу, %	
		Pb	Zn	Pb	Zn
тығыздығы 2,20 г/см ³					
Жеңіл фракция	19,79	0,17	0,20	2,34	0,74
Ауыр фракция	58,01	1,86	7,12	75,07	77,44
-5+1	7,97	1,32	5,28	7,33	7,89
-1+0	14,24	1,54	5,22	15,26	13,93
Бастапқы кен	100,00	1,44	5,33	100,0	100,0
тығыздығы 2,25 г/см ³					
Жеңіл фракция	24,07	0,19	0,28	3,18	1,26
Ауыр фракция	53,73	1,99	7,63	74,27	76,90
-5+1	7,97	1,32	5,28	7,32	7,89
-1+0	14,24	1,54	5,22	15,23	13,94
Бастапқы кен	100,00	1,44	5,33	100,0	100,0
Ескертп — автормен құрастырылған					

Ескерту – автормен құрастырылған

Болжалды баланстың нәтижелері бойынша мыналар:

– ауыр суспензияның тығыздығы 2,20 г/см³ болған кезде бастапқы кеннен қорғасын мен мырыш мөлшері 0,17 % және 0,20 % болатын бос жыныстың 19,79 % - от шығаруға болады, бұл ретте салыстырмалы шығындар металдарға сәйкесінше 2,34 және 0,74 % құрайды;

– 2,25 г/см³ тығыздығы кезінде тау жыныстарының шығымы – 0,19 % қорғасын құрамымен 24,07 % және салыстырмалы шығын – 3,18 %; мырыш – 0,28 %, салыстырмалы шығын – 1,26 % құрайды.

Ауыр суспензияда байытудың ең қолайлы нұсқасы -25+5 мм класын байыту болып табылады.

-25+5 мм класты ауыр суспензиядағы кен сынамасын алдын ала байыту есебінен ауыр фракциядағы металдардың құрамын арттыруға болады: қорғасын мен мырыш 1,3 есе.

Ауыр фракцияның шығымдылығы болжамды теңгерім бойынша кеннің ұсақтарын есепке алғанда 61,7 - 65,98 %, ең ұсақ кластарды (шлам) есепке алғанда – 75,94 - 80,21 % құрайды.

Қорытынды.

1. Рационалды талдау нәтижелері бойынша бастапқы кен үлгісіндегі металдардың тотыққан және қиын байытылатын түрлерінің мөлшері: мырыш – 12,50 %, қорғасын – 14,35 %, мыс – 54,90 % екені анықталды.

2. Ауыр сұйықтықта «Жәйрем» кен орнының тотыққан қорғасын-мырыш кенінің сынамасын 2,40 – 2,45 г/см³ тығыздықтар аралығында байыту кезінде мынадай өнімдерді алуға болады: ауыр фракция – шығымы – 90,84 %, оның құрамында қорғасын – 1,54 – 1,58 %, мырыш – 6,05 – 6,20 %; қорғасын алу 99,48 - 99,30 %, мырыш – 99,75 - 99,67 %; жеңіл фракция: шығу - 21,92 %; қорғасын алу – 2,26 % -3,05 %, мырыш – 0,80 - 1,14 %; жеңіл фракциядағы қорғасын мөлшері – 0,15-0,17 %, мырыш – 0,20-0,24 %;

3. Ауыр суспензияда «Жәйрем» кен орнының тотыққан қорғасын-мырыш кенінің сынамасын байыту кезінде тығыздығы 2,20 - 2,25 г/см³ интервалында -25+5 мм ірілік класынан мынадай өнімдерді алуға болады: өнімділігі 69,07 - 74,54 %, құрамында қорғасын - 1,86 - 1,99 %, мырыш – 7,12 - 7,63 %; қорғасын алу 95,91-96,98 %, мырыш - 98,39-99,05 %; жеңіл фракция: операциядан шығу – 25,43 - 30,93 % (кеннен 19,79-24,06); қорғасын алу - 3,02 - 4,09 %, мырыш – 0,95 - 1,61 %; жеңіл фракциядағы құрам қорғасын – 0,17 - 0,19 %, мырыш - 0,20 - 0,28 %.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант № AP25797107 – Түсті металдардың тотыққан кендерін өңдеудің тиімді кешенді технологиясын әзірлеу).

Ғылыми мақаланы жазу процесінде генеративті ЖИ және оның көмегімен технологияны қолдану туралы хабарлама. Бұл жұмысты дайындау кезінде авторлар генеративті ЖИ қолданбады.

Әдебиеттер тізімі

- Yushina T.I., Yergeshev A.R., Dumov A.M., Makavetskaskas A.R. (2022). Study of the material composition of lead-zinc ore of the Shalkiya deposit in order to determine the possibility of its processing. Non-ferrous Metals, vol. 2, 8–14, <https://doi.org/10.17580/nfm.2022.02.02>.
- Shevko V.M., Zharmentov A.A., Aitkulov D.K., Terlikbaeva A.Zh. (2021). Complex processing of oxidized copper and zinc oxide ores with simultaneous production of several products. Physicochem. Probl. Miner. Process, 57(1), 226-249, <https://doi.org/10.37190/ppmp/131091>.
- Chepushtanova T.A., Merikbayev Y.S., Baigenzhenov O.S., Mishra B. (2023). Technology of high-temperature sulfidizing roasting of oxidized lead-zinc ore in a fluidized bed furnace. Non-ferrous Metals vol. 1, 3–10, <https://doi.org/10.17580/nfm.2023.01.01>.

- Antropova I.G., Gulyashinov P.A., Budaeva A.D., Dashiev I.P., Khomoksonova D.P. (2024). Processing of Oxidized Lead–Zinc Ore by Co-Roasting with Pyrite-Bearing Ore. *Minerals*, vol. 14, 1241, <https://doi.org/10.3390/min14121241>.
- Mütevelloğlu N.A., Yekeler M. (2019). Beneficiation of Oxidized Lead-Zinc Ores by Flotation Using Different Chemicals and Test Conditions. *Mineral Dressing*, vol. 55, 327–332, <https://doi.org/10.1134/S1062739119025623>.
- Ramazanov R.A., Seraya N., Daumova G., Mamayeva A., Saurbayeva B., Idrisheva Zh. (2023). Assessing the Feasibility of Utilizing a Method for Processing Oxidized Zinc Ores. *ES Materials and Manufacturing*, vol. 22, 993, <https://dx.doi.org/10.30919/esmm993>.
- Ramazanov R.A., Zhussupova A.K., Mamyachenkov S.V., Seraya N.V., Daumova G.K., Azbanbayev E.M. (2021) Thermodynamic Description of Oxidized Zinc Minerals and Comparative Analysis of Their Reactivity. *Chemical engineering transactions*, vol. 88, 1159-1164, <https://doi.org/10.3303/CET2188193>.
- Ramazanov R.A., Samoilov V.I., Seraya N.V., Daumova G.K., Azbanbayev E.M., Aubakirova R.A. (2021). Investigation of the kinetics of sulphuric acid leaching of zinc from calamine. *Metallurgija*, 60(1-2), 113–116, <https://hrcak.srce.hr/246104>.
- Ramazanov R.A., Mamyachenkov S.V., Seraya N.V., Daumova G.K., Aubakirova R.A., Bagasharova Z.T. (2021). Research of kinetics of zinc leaching with sulfuric acid from smithsonite. *Metallurgija*, 60(3-4), 407–410, <https://hrcak.srce.hr/256122>.
- Руды и концентраты цветных металлов (2010). Методы отбора и подготовки проб для химического анализа и определения влаги. Межгосударственный стандарт. Москва. Стандартиформ, 20 с. // Rudy i koncentraty cvetnyh metallov (2010). Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo analiza i opredeleniya vlagi. Mezghosudarstvennyj standart. Moskva. Standartinform, 20 s.
- Методические рекомендации по применению классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твёрдых полезных ископаемых (2007). Свинцовые и цинковые руды. – М.: ФГУ ГКЗ, 40 с. // Metodicheskie rekomendacii po primeneniyu klassifikacii zapasov mestorozhdenij i prognoznnyh resursov tvordyyh poleznyh iskopaemyh (2007). Svincovyie i cinkovyie rudy. – М.: FGU GKZ, 40 s.
- Абрамов А.А. (2005). Технология переработки и обогащения руд цветных металлов, книга 1. – М.: МГГУ, Т. 3. – 575 с. // Abramov A.A. (2005). Tekhnologiya pererabotki i obogashcheniya rud cvetnyh metallov, kniga 1. – М.: MGGU, Т. 3. – 575 s.
- Абрамов А.А. (1985). Переработка окисленных руд. – М.: Наука – 232 с. // Abramov A.A. (1985). Pererabotka oksislennyh rud. – М.: Nauka – 232 s.
- Абрамов А.А. (2005). Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Рудоподготовка и Cu, Cu-Py, Cu-Fe, Mo, Cu-Mo, Cu-Zn руды, книга 1. – М.: МГГУ, Т. 3. – 575 с. // Abramov A.A. (2005). Tekhnologiya pererabotki i obogashcheniya rud cvetnyh metallov. Rudopodgotovka i Cu, Cu-Py, Cu-Fe, Mo, Cu-Mo, Cu-Zn rudy, kniga 1. – М.: MGGU, Т. 3. – 575 s.
- Орлов А.К. (2004). Metallurgiya svintsa i cinka: uchebnoe posobie. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт. – 71 с. // Orlov A.K. (2004). Metallurgiya svinca i cinka: uchebnoe posobie. – SPb.: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj gornyj institut. - 71 s.

Information about authors

Ramazanov Raigul Amangeldinovna – PhD, East Kazakhstan Technical University named after. D. Serikbaeva, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, R.Ramazanov@edu.ektu.kz, raigul_77_33@mail.ru, 8-776-466-88-89

Shaimardan Nurzhan – PhD, East Kazakhstan Technical University named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, nurjan2010@mail.ru, 8-701-104-07-86

Saurbayeva Bekzat Sagatbekovna – candidate of chemical sciences, EKTU, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, saurbaeva71@mail.ru, 87773156261

Tantybayeva Batima – Candidate of Pedagogical Sciences, East Kazakhstan University named after S. Amanzholov, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, bati_54@mail.ru, 87771511114

Mamyachenkov Sergey Vladimirovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Non-Ferrous Metallurgy of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, svmamyachenkov@yandex.ru, +79630464556

ЖАБЫНДАР МЕН ҚАБЫҚШАЛАР
ПОКРЫТИЯ И ПЛЕНКИ
COATINGS AND FILMS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_52
IRSTI 55.22.00

B.K. Rakhadilov^{1,2}, N.M. Magazov², Y.S. Molbossynov², A.K. Apsezhanova^{2,3}, A.Y. Kussainov²

¹PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

E-mail: rakhadilovb@gmail.com

²Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan;

E-mail: magazovn@gmail.com

E-mail: molbossynov.ye@edu.ektu.kz*

E-mail: akbotaapsezhanova@gmail.com

E-mail: arys20055@gmail.com

³INNTECHMASH Engineering Center, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan;

E-mail: akbotaapsezhanova@gmail.com

**EFFECT OF WIRE FEED RATE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES
OF COATINGS IN THE ELECTRIC ARC SPRAYING PROCESS**

**ЭЛЕКТРОДАЛЫҚ БҮРКУ КЕЗІНДЕ СЫМ БЕРУ ЖЫЛДАМДЫҒЫНЫҢ ЖАБЫН
ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕРІ**

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
ПОКРЫТИЙ ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОМ НАПЫЛЕНИИ**

Abstract. In this work, a study of steel coatings obtained by arc spraying using steel wire of the 30KhGSA grade has been carried out. The main attention is paid to the effect of the wire feed rate on the coating characteristics. The feed rate varied from 2 to 12 cm/sec. The results showed that an increase in the wire feed rate leads to a significant change in the coating characteristics.

According to experimental data, a direct relationship was found between the wire feed rate and the coating thickness. At a speed of 2 cm/sec, the thickness was 108.4 μm , and at a maximum speed of 12 cm/sec – 733.62 μm . An increase in the feed rate led to a decrease in porosity. The highest porosity (10.45%) was observed at a minimum speed, whereas at a speed of 12 cm/sec, porosity decreased to 4.33%. The analysis of images obtained using a metallographic microscope revealed a layered structure of coatings with alternating light and dark phases. With an increase in the feed rate, the structure was compacted and the number of cracks decreased. X-ray diffraction analysis showed that the largest amount of oxides was formed at the minimum wire feed rate, whereas at the maximum speed oxidation was minimal. Hardness measurements by the Vickers method showed that with an increase in the wire feed rate, the hardness of the coating decreased, although different optimal values were observed for different structures. Optimal roughness values (R_a and R_z) were achieved at a feed rate of 4 cm/sec. Increasing the speed to 8 and 12 cm/sec led to a deterioration in surface roughness.

Keywords: arc spraying; steel coatings; microstructure; Vickers hardness; porosity; thickness

Аңдатпа. Бұл жұмыста 30ХГСА маркалы болат сымы қолданылған электр доғалық металлдау әдісімен алынған болат жабындарын зерттеу жүргізілді. Негізгі назар сымның беру жылдамдығының жабын сипаттамаларына әсеріне аударылды. Сым беру жылдамдығы 2-ден 12 см/сек дейін өзгертілді. Нәтижелер көрсеткендей, сымның беру жылдамдығын арттыру жабын сипаттамаларының айтарлықтай өзгеруіне әкеледі.

Эксперименттік мәліметтер бойынша сымның берілу жылдамдығы мен жабынның қалыңдығы арасындағы тікелей байланыс анықталды. 2 см/сек жылдамдықта қалыңдығы 108,4 мкм, ал 12 см/сек максималды жылдамдықта 733,62 мкм болды. Жеткізу жылдамдығының жоғарылауы кеуектіліктің төмендеуіне әкелді. Ең үлкен кеуектілік (10,45 %) ең төменгі жылдамдықта байқалды, ал 12 см/сек жылдамдықта кеуектілік 4,33 % дейін төмендеді. Металлографиялық микроскоппен алынған кескіндерді талдау ауыспалы жарық пен қараңғы фазалары бар жабындардың қабатты құрылымын анықтады. Жеткізу жылдамдығының жоғарылауымен құрылымның тығыздалуы және жарықтар санының азаюы байқалды.

Рентгендік құрылымдық талдау оксидтердің ең көп саны сымның ең аз беру жылдамдығында, ал ең жоғары жылдамдықта тотығу минималды болатынын көрсетті. Викерс әдісімен қаттылықты өлшеу сымның берілу жылдамдығының жоғарылауымен жабынның қаттылығы төмендегенін көрсетті, дегенмен әр түрлі құрылымдар үшін әр түрлі оңтайлы мәндер байқалды. Оңтайлы кедір-бұдыр мәндеріне (R_a және R_z) жеткізу жылдамдығы 4 см/сек болғанда қол жеткізілді. Жылдамдықтың 8 және 12 см/с дейін артуы бетінің кедір-бұдырының нашарлауына әкелді.

Түйін сөздер: догалы бүрку; болаттан жасалған жабындар; микроқұрылым; Виккерс қаттылығы; кеуектілік; қалыңдық.

Аннотация. В данной работе проведено исследование стальных покрытий, полученных методом электродуговой металлизации с использованием стальной проволоки марки 30ХГСА. Основное внимание уделено влиянию скорости подачи проволоки на характеристики покрытия. Скорость подачи варьировалась от 2 до 12 см/сек. Результаты показали, что увеличение скорости подачи проволоки приводит к значительному изменению характеристик покрытия.

По экспериментальным данным обнаружена прямая зависимость между скоростью подачи проволоки и толщиной покрытия. При скорости 2 см/сек толщина составляла 108,4 мкм, а при максимальной скорости 12 см/сек – 733,62 мкм. Увеличение скорости подачи привело к снижению пористости. Наибольшая пористость (10,45 %) наблюдалась при минимальной скорости, тогда как при скорости 12 см/сек пористость снизилась до 4,33 %. Анализ изображений, полученных с помощью металлографического микроскопа, выявил слоистую структуру покрытий с чередующимися светлыми и темными фазами. При увеличении скорости подачи наблюдалось уплотнение структуры и уменьшение количества трещин. Рентгеноструктурный анализ показал, что наибольшее количество оксидов образовалось при минимальной скорости подачи проволоки, тогда как при максимальной скорости окисление было минимальным. Измерения твердости методом Виккерса показали, что с увеличением скорости подачи проволоки твердость покрытия снижалась, хотя для разных структур наблюдались различные оптимальные значения. Оптимальные значения шероховатости (R_a и R_z) были достигнуты при скорости подачи 4 см/сек. Увеличение скорости до 8 и 12 см/сек привело к ухудшению шероховатости поверхности.

Ключевые слова: дуговое напыление; стальные покрытия; микроструктура; твердость по Виккерсу; пористость; толщина.

Introduction. Thermal spraying technologies include processes where molten or heated materials are sprayed onto the surface of products using electric (plasma, arc (Bobzin, Wietheger, Burbaum, Johann, 2022, Gargasas, Valiulis, Gedzevičius, Mikaliūnas, Nagurnas, Pokhmurska, 2016)) or gas (Rakhadilov, Kenesbekov, Kowalevski, Ocheredko, Sagdoldina, 2020, Zhu, Li, Yang, Ye, 2023) installations. These methods make it possible to apply thick coatings (from 20 microns to several millimeters) over large areas at high speed, which makes them effective for industrial applications. Coatings can consist of various materials such as metals, alloys, ceramics and plastics.

The quality of the coatings obtained is assessed on the basis of various characteristics such as porosity, oxide content, hardness, bond strength and surface roughness (Kumar, S, Kumar, R, 2021). The general trend shows that an increase in the velocity of the particles used in the spraying process contributes to an improvement in the quality of the coating.

Electric arc spraying (EAS) is a highly efficient metal coating technology widely used in industry and agriculture. This method allows you to restore machine parts, protect metal structures from corrosion, and create coatings from various metals and their alloys.

In the EAS process, the wire melts under the influence of an electric arc and is sprayed with compressed air onto the surface of the product. The use of compressed air or nitrogen provides a stable and high-quality coating.

The key advantages of EAS include high productivity and the ability to apply to various materials. However, with a low wire feed rate, there is a risk of overheating and oxidation, as well as a decrease in the content of alloying elements in the coating (Arif, Shah, Rehman,

Tariq,2020). It is important to take these limitations into account so as not to degrade the mechanical properties of the parts being restored.

Materials and methods of research. Coating spraying was performed using a supersonic electric arc metallizer SX-600, manufactured by Guangzhou Sanxin Metal Technology Co (Guangzhou, China) (Rakhadilov, Shynarbek, Kakimzhanov, Kusainov, Zhassulan, Ormanbekov,2024). This complex includes a power supply, a supersonic spray gun, a control system and a compressed air system.

The spraying of the wires was carried out in accordance with the modes indicated in Table 1. The parameters in these modes varied by changing the wire feed rate (V). The voltage during spraying was maintained at the level shown in Table 1, their characteristics increase as the wire feed rate increases. Air was used as the spraying gas. Each sample was sprayed over the entire surface of the substrate for 10 seconds to obtain a uniform layer.

Table 1. Spraying modes

Sample	P, Pa	D, mm	I, A	U, B	V, cm/s
№ 1	9	200	200	30	2
№ 2	9	200	200	40	4
№ 3	9	200	300	40	8
№ 4	9	200	300	45	12
<i>Note – compiled by the authors</i>					

In this work, grade 65G steel (GOST 103-2006) was used as the substrate material. 65G steel is widely used in mechanical engineering, machine tool construction, shipbuilding, as well as in the production of heavy military, agricultural and mining equipment. Springs, washers, friction discs, brake belts, gears, bearing housings, flanges are made of 65G steel. The possibility of improving the properties of 65G steel by quenching significantly extends the service life and increases the wear resistance of parts. The composition of 65G steel according to GOST 14959-79 is shown in Table 2.

Table 2. The content of elements in 65G steel according to GOST 14959-79

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.62 - 0.7	0.17 - 0.37	0.9 - 1.2	up to 0.25	up to 0.035	up to 0.035	up to 0.25	up to 0.2
<i>Note – compiled by the authors</i>							

Steel wire of the 30KhGSA grade, with a diameter of 1,4 mm, was used as the coating material. 30KhGSA steel is characterized by high strength and rigidity, as well as excellent weldability and machinability properties. Due to these qualities, it is widely used in mechanical engineering and the automotive industry. 30KhGSA steel is used in the manufacture of crankshafts, connecting rods, cylinder heads and other parts. In mechanical engineering and in the manufacture of construction equipment, this steel is used to produce shafts, axles, gears, bolts and screws designed for significant loads. According to GOST 4543-71, 30KhGSA steel has the following composition (Table 3).

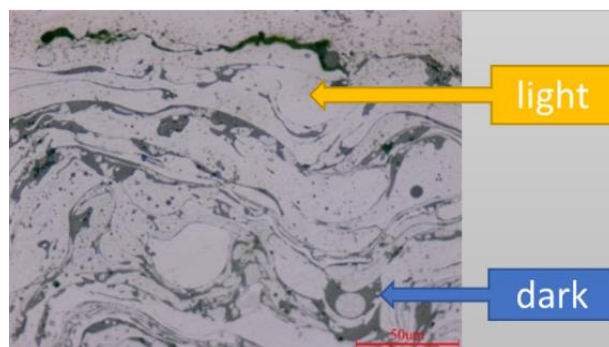
Table 3. The content of elements in 30KhGSA steel according to GOST 4543-71

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0.28 - 0.34	0.9 - 1.2	0.8 - 1.1	up to 0.3	up to 0.025	up to 0.025	0.8 - 1.1	up to 0.3
<i>Note – compiled by the authors</i>							

Cross sections of the samples were prepared to study the structure and porosity of the coatings. The samples were made using standard partitioning methods followed by grinding and mechanical polishing. Grinding was carried out using sandpaper with a grain size from 120 to 3000 based on silicon carbide (SiC), and polishing was carried out on velvet fabric using 3M polishing paste on an automatic grinding machine of the METAPOL 2200P model (Laizhou Lyric Testing Equipment Co, Shandong, China). To study the porosity of coatings using an optical microscope (Olympus BX53M, Tokyo, Japan), images were taken with magnification of 5X and 50X. Porosity was calculated using Metallographic Analysis Software in accordance with the ASTM E2109 standard. The average coating thickness was determined based on five measurements for each image. The roughness of the coatings was measured by contact profilometry using a profilometer 130 (Proton, Zelenograd, Russia, 2018) (Rysin, 2017). To ensure the repeatability of the results and minimize the error, five measurements were carried out on each sample in random places, followed by the calculation of the values of Ra (arithmetic mean deviation of the profile) and Rz (maximum profile height) according to GOST 2789-73. The analysis of the surface roughness values was carried out to assess the effect of various spraying parameters. According to the Vickers method, a semi-automatic micro hardness tester (Metolab 502, St. Petersburg, Russia) was used in accordance with GOST 2999-75. X-ray diffractometer X'pertpro (Philips Corporation, Eindhoven, the Netherlands) was used to determine the phase composition.

Results and discussion. Based on the images obtained using a metallographic microscope, it was found that when spraying by arc spraying, layered coatings with a certain porosity are formed. (Khan, 2019).

The analysis showed that the structure consists of light and dark areas (Figure 1), and they change with each other. Alternating lamellae of both phases are observed in all samples. Rounded light phases inside dark areas were also revealed. The dark areas have cracks, while the light areas do not and seem to prevent cracks from spreading from the dark areas (Rakhadilov, Magazov, Kakimzhanov, Apsezhanova, Molbossynov, Kengesbekov, 2024).

**Figure 1.** An image of a metallographic microscope with a magnification of 5X

Note – compiled by the authors

Thickness and porosity are the key properties that determine the characteristics of coatings. In Table 4, you can see how these properties change depending on the deposition rate.

Table 4. Results of coating thickness and porosity

№	Wire feed rate, cm/sec	Coating thickness, μm	Porosity of coatings, %
1	2	108,4	10,45
2	4	276,9	12,59
3	8	491,78	8,38
4	12	733,62	4,33
Note – compiled by the authors			

The effect of the wire feed rate on the coating thickness shows a direct relationship: with increasing speed, the coating thickness increases. Figure 2 shows the images obtained using a metallographic microscope. The porosity of the coatings also decreased with an increase in the wire feed rate, reaching minimum values of 8.38% and 4.33% at 8 and 12 cm/s, respectively. An increase in the wire feed rate leads to an increase in the volume of the sprayed material, which contributes to a greater formation of the coating thickness. This can also lead to a denser coating by better filling the surface and reducing the number of pores and voids. Additionally, an increase in the wire feed rate leads to more particles settling on the surface, which enhances. The impact on the already applied layers helps to seal the coating, reducing its porosity.

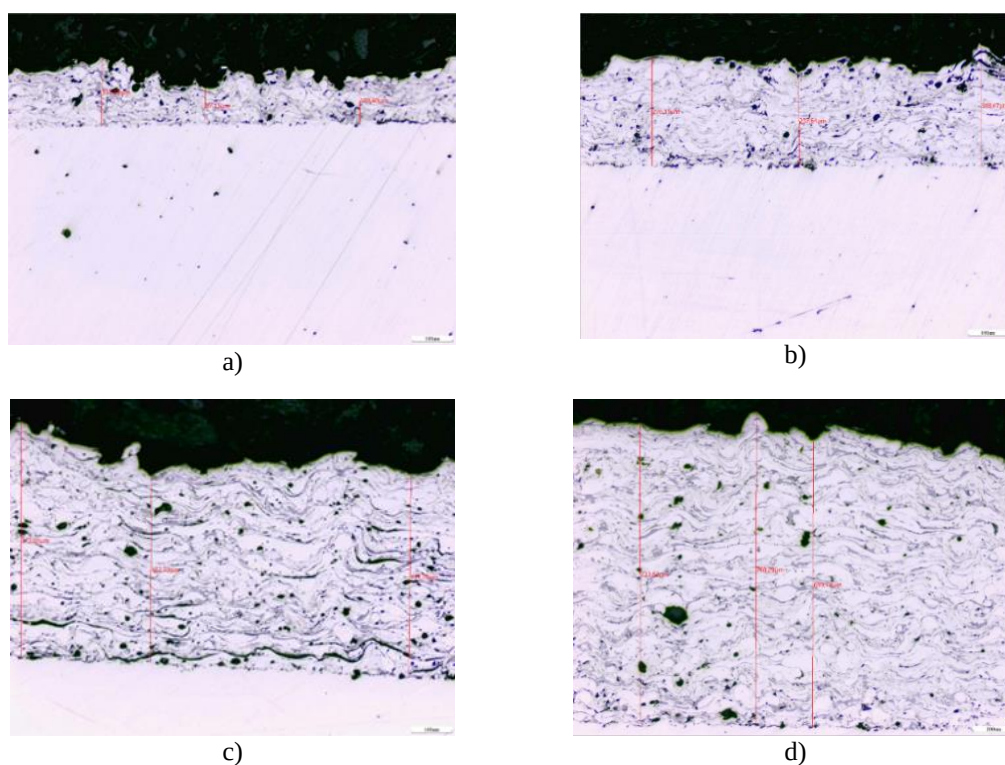


Figure 2. Image of coating thickness obtained with a metallographic microscope:

a) Sample № 1; b) Sample № 2; c) Sample № 3; d) Sample № 4

Note – compiled by the authors

Figure 3 shows the results of X-ray diffraction analysis (XRD) for four samples designated as № 1, № 2, № 3 and № 4. The graphs show the intensity of scattered X-ray radiation depending on the diffraction angle.

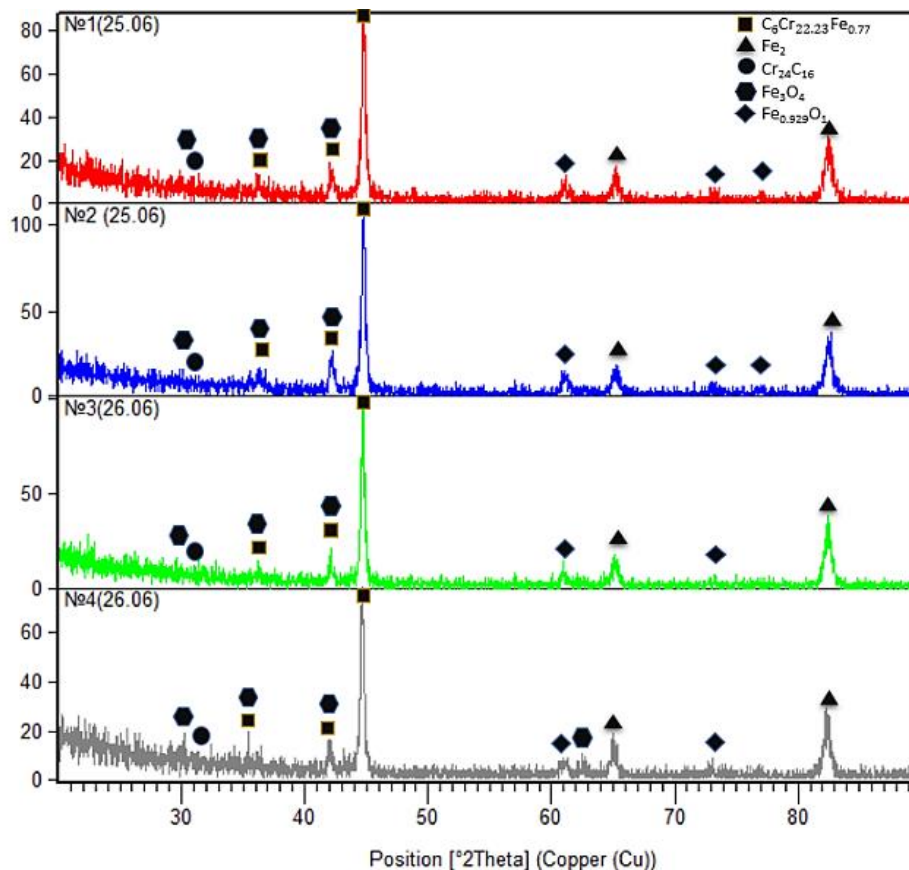


Figure 3. X-ray of steel coatings

Note – compiled by the authors

The results of X-ray phase analysis revealed oxides, which are shown in Figure 3. The proportion of oxides (Fe_3O_4 , $\text{Fe}_{0.929}\text{O}_1$) on samples No. 1, No. 2 and No. 3 was slightly higher at low wire feed. The lowest oxide intensity was observed on sample No. 4, where it was significantly lower, and the wire feed was the highest among all samples. The presence of these phases, shown in Figure 3, indicates the presence of oxidation processes on the surface of the samples. This can be explained by the fact that spraying occurs in the atmosphere.

The results of hardness measurements on the Metolab-502 microhardness tester are shown in Figure 4.

Figure 4 shows the data on the hardness of the material when the wire feed rate changes. Hardness was shot in two different areas (light and dark) as shown in Figure 4. The dark area mainly consists of oxides (Fe_3O_4 , $\text{Fe}_{0.929}\text{O}_1$). The light layer mainly consists of phases. With an increase in the wire feed rate from 2 cm/sec to 12 cm/sec, there is a general tendency to decrease the hardness of the material, except for some differences.

For a coating with a "gray" structure, the maximum hardness is observed at a wire feed rate of 8 cm/sec, which differs from a coating with a "white" structure, where maximum hardness is achieved at a minimum feed rate.

The optimal feed rate may vary depending on the type of structure, although the material is the same. For the "gray" structure, the optimal hardness is achieved at an average feed rate (8 cm/sec), whereas for the "white" structure – at a minimum speed (2 cm/sec).

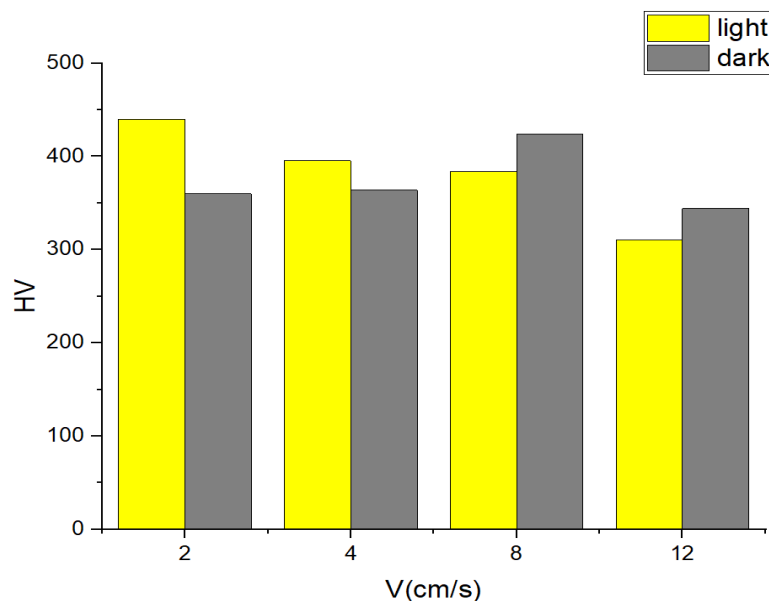


Figure 4. The hardness of steel coatings in two different structures

Note – compiled by the authors

According to the presented data, it can be concluded that white and gray structures are inversely dependent on each other in the process of changing the deposition parameters. White structures show improved performance when the wire feed rate decreases, whereas gray structures, on the contrary, improve when the feed rate increases. This inverse proportionality indicates their interdependence, where optimization of one parameter contributes to the development of certain phases and structures that affect the mechanical properties of the coating. (Wagner, 2021, Logachev, Litovchenko, 2014).

Surface roughness plays an important role in determining the performance properties of the coating, such as wear resistance and corrosion resistance. To quantify the surface roughness, the parameters R_a (the arithmetic mean deviation of the profile) and R_z (the height of the profile irregularities at ten points) were selected in Figure 5. The change in the parameters of the surface roughness of the steel coating at different wire feed speeds (V , cm/s) is shown.

The analysis shows that at a low wire feed rate of 2 cm/s, relatively high values of both the parameter R_a (17,04 μm) and R_z (81,23 μm) are observed, which may indicate a rougher surface texture with a large number of irregularities. An increase in the feed rate to 4 cm/s leads to a significant decrease in both parameters, which indicates a smoother surface. With a further increase in velocity to 8 cm/s, the parameters R_a and R_z increase to values 13,96 μm and 81,28 μm , respectively, which indicates a deterioration in surface roughness and an increase in the number of irregularities. At a maximum feed rate of 12 cm/s, the R_a and R_z values remain high, confirming the rough texture of the coating (Johnston, Hall, McCloskey, 2013).

The optimal roughness of the coating is achieved at a wire feed rate of 4 cm/s, at which the roughness values are minimal. An increase in speed leads to an increase in roughness, which negatively affects the surface quality (Kang, 2017).

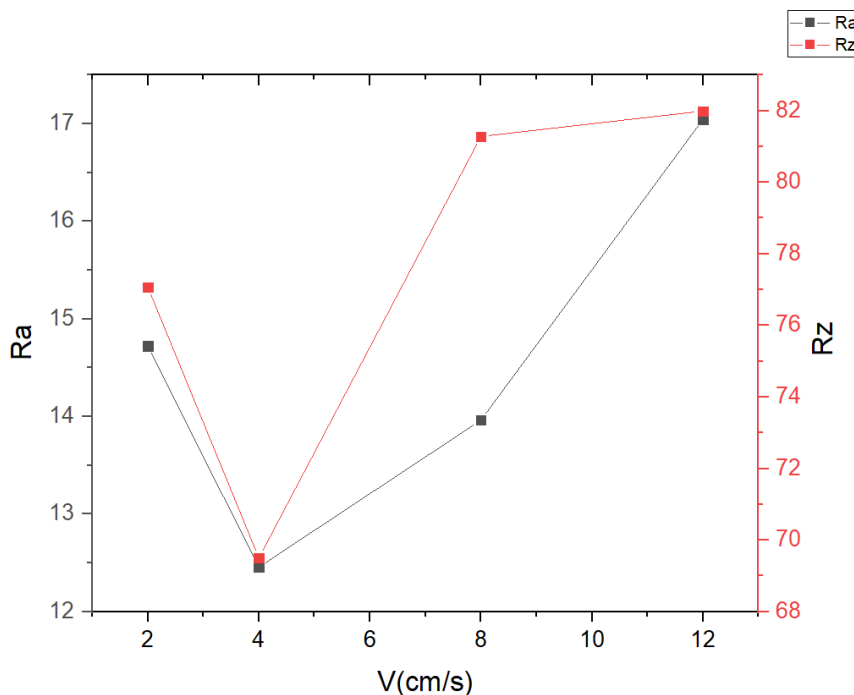


Figure 5. Roughness parameters R_a and R_z .

Note – compiled by the authors

Conclusions. As a result of the conducted research, it was found that the parameters of arc spraying, in particular the wire feed rate, have a significant effect on the characteristics of the coatings obtained. According to the results of the X-ray phase analysis with the entrainment of the wire feed rate, two different layers are visible with different whistles and this affects the hardness of the coatings. The microstructures show that the layer consists of light and dark areas. An increase in the wire feed rate leads to an increase in the thickness of the coating and a decrease in its porosity, which improves the overall microstructure of the coating. At the same time, an increase in the feed rate is accompanied by a decrease in the hardness of the coating and an increase in surface roughness, which indicates the need for precise selection of the spraying mode depending on the required performance characteristics of the coating. Thus, the optimization of the deposition parameters makes it possible to achieve a balance between mechanical and structural characteristics, which opens up prospects for the widespread use of arc spraying in industry.

Acknowledgements. This research was funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant BR21882370).

Notice of the use of generative AI and AI-enabled technologies in the writing of the manuscript. The author group did not use generative AI in the preparation of this article.

References

- Bobzin, K.; Wietheger, W.; Burbaum, E.; Johann, L.M. High-Velocity Arc Spraying of Fe-Based Metallic Glasses with High Si Content. *J Therm Spray Tech* 2022, 31, 2219–2228, doi:10.1007/s11666-022-01433-w.
- Gargasas, J.; Valiulis, A.V.; Gedzevičius, I.; Mikaliūnas, Š.; Nagurnas, S.; Pokhmurska, H. Optimization of the Arc Spraying Process Parameters of the Fe–Base Mn–Si–Cr–Mo–Ni Coatings for the Best Wear Performance. *ms* 2016, 22, 20–24, doi:10.5755/j01.ms.22.1.7339.

- Rakhadilov, B.K.; Kenesbekov, A.B.; Kowalevski, P.; Ocheredko, Y.A.; Sagdoldina, Z.B. Development of Air-Plasma Technology for Hardening Cutting Tools by Applying Wear-Resistant Coatings. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences* 2020, 3, 54–62, doi:10.32014/2020.2518-170X.54.
- Zhu, H.; Li, D.; Yang, M.; Ye, D. Prediction of Microstructure and Mechanical Properties of Atmospheric Plasma-Sprayed 8YSZ Thermal Barrier Coatings Using Hybrid Machine Learning Approaches. *Coatings* 2023, 13, 602, doi:10.3390/coatings13030602.
- Kumar, S.; Kumar, R. Influence of Processing Conditions on the Properties of Thermal Sprayed Coating: A Review. *Surface Engineering* 2021, 37, 1339–1372, doi:10.1080/02670844.2021.1967024.
- Arif, Z.U.; Shah, M.; Rehman, E.U.; Tariq, A. Effect of Spraying Parameters on Surface Roughness, Deposition Efficiency, and Microstructure of Electric Arc Sprayed Brass Coating. *International journal of advanced and applied sciences* 2020, 7, 25, doi:10.21833/ijaas.2020.07.004.
- S. Kumar, A. S. M. A. Rahman, and J. K. Y. Low, "Review on Electric Arc Surfacing: Performance, Limitations and Applications," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 58, pp. 372-384, 2020.
- Rakhadilov B, Shynarbek A, Kakimzhanov D, Kusainov R, Zhassulan A, Ormanbekov K. Effect of Voltage on Properties of 30HGSA Steel Coatings by Supersonic Supersonic arc metallization Method. *Advances in Science and Technology Research Journal*. 2024;18(5):113-124.
- Rysin A. V. et al. Derivation of the proton-to-electron mass ratio based on the laws of the universe and thermodynamic equilibrium // *Sciences of Europe*. – 2017. – №. 19 (19).
- Khan, M. A., et al. (2019): "Influence of Electric Arc Deposition Parameters on the Microstructure and Porosity of Coatings", *Surface and Coatings Technology*, 372, 135-142.
- Rakhadilov, B.; Magazov, N.; Kakimzhanov, D.; Apsezhanova, A.; Molbosynov, Y.; Kengesbekov, A. Influence of Spraying Process Parameters on the Characteristics of Steel Coatings Produced by Arc Spraying Method. *Coatings* 2024, 14
- Wagner, N. Effect of Process Parameters on Twin Wire Arc Sprayed Steel Coatings. *J. of Materi Eng and Perform* 30, 6650–6655 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05941-8>
- Logachev, V.N., Litovchenko, N.N. Electric arc metallization: ways to improve equipment and technology. *Proceedings of GOSNITI*, 2014; 117: 228-234.
- Johnston, A.L.; Hall, A.C.; McCloskey, J.F. Effect of Process Inputs on Coating Properties in the Twin-Wire Arc Zinc Process. *J Therm Spray Tech* 2013, 22, 856–863, doi:10.1007/s11666-013-9949-0.
- Kang, S., et al. (2017): "Influence of Deposition Parameters on the Surface Roughness and Mechanical Properties of Coatings in Thermal Spray Process", *Journal of Thermal Spray Technology*, 26(2), 214-224.

Information about authors

Rakhadilov Baurzhan Korabayevich – PhD, PlasmaScience LLP, Ust-Kamenogorsk, 070002, Kazakhstan, rakhadilovb@gmail.com

Magazov Nurtolau Magzumbekovich – PhD candidate, Researcher at Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070002, Kazakhstan, magazovn@gmail.com

Molbosynov Yermakhan Serikovich – Bachelor, Technician at Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070002, Kazakhstan, molbosynov.ye@edu.ektu.kz +7 777 155 99 04

Apsezhanova Akbota Kudaibergenkyzy – Researcher at D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070002, Kazakhstan, akbotaapsezhanova@gmail.com

Kussainov Arystanbek Yerlanovich – PhD candidate, Junior Researcher at Daulet Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, 070010, Kazakhstan, arys20055@gmail.com

ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО
ENGINEERING AND ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_61
MPHTI 55.19.03

Н.Н. Рахымтай¹, Д.С. Мырзалиев², К.К. Сейтказенова³,
Н.А. Кадиров⁴, О.Б. Сейдуллаева⁵

Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Казахстан

¹E-mail: saya_rakhumtay@mail.ru

²E-mail: darkhan-m7@mail.ru

³E-mail: kseitkazi@mail.ru

⁴E-mail: kadirovnurdaulet1010@gmail.com

⁵E-mail: orynkul_s@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ

ТОКАРЛЫҚ ӨНДЕУ КЕЗІНДЕ СОҢҒЫ ЭЛЕМЕНТТЕР ӘДІСІМЕН КЕСУ АЙМАҒЫНДАҒЫ ТЕМПЕРАТУРАНЫ ЗЕРТТЕУ

INVESTIGATION OF THE TEMPERATURE IN THE CUTTING ZONE BY THE FINITE ELEMENT METHOD DURING TURNING

Аннотация. Известно, что при резании механическая энергия, затрачиваемая режущим инструментом, превращается в тепло. Теплообразование – одна из причин ускоренного износа инструмента.

Цель данного исследования – методом конечных элементов исследовать влияние температуры на состояние инструмента в процессе резания металлических материалов токарными подрезными резцами.

Для исследования были выбраны режущие инструменты из твердого сплава ВК8 и быстрорежущей стали P18. Сплав ВК8 сочетает высокую твердость с высокой прочностью при повышенной температуре. Высокая теплопроводность этого сплава является отличительным свойством инструмента, поскольку она снижает склонность к быстрому локальному термическому размягчению. Сталь P18 обладает высокой износостойкостью, достаточной прочностью и устойчива к нагреву.

Показана эффективность метода конечных элементов при прогнозировании температуры резания и напряженного состояния твердосплавного режущего инструмента.

Знание температурных полей, возникающих в процессе резания, очень важно для разработки новых технологий, направленных на увеличение срока службы инструмента и снижение производственных затрат. Сила резания рассматривается как главный вид нагрузки при резании. Распределение температуры в твердосплавном режущем инструменте выполнено с использованием аналитического программного обеспечения Solidworks Simulation. Модель создается в виде сетки в Solidworks Simulation, и задается сила резания. С помощью этих данных можно определить температуру и напряжение компонента производственного процесса, к которым можно отнести режущий инструмент. Таким образом, исследование температуры и напряжения выполняется с использованием Solidworks Simulation. Полученные результаты можно использовать при прогнозировании срока службы режущего инструмента и целостности обрабатываемой детали.

Ключевые слова: обработка резанием, тепловые явления резания, износ, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов (МКЭ), Solidworks Simulation.

Аңдатпа. Кесу кезінде кескіш құралды өңдеу жылуга айналатыны белгілі. Жылудың пайда болуы – құралдың тез тозуының себептерінің бірі.

Бұл зерттеудің мақсаты – соңғы элементтер әдісімен металл материалдарды токарлық бұйыршықтейтін кескіштермен кесу процесінде құралдың күйіне температураның әсерін зерттеу.

Зерттеу үшін VK8 қатты қорытпасынан және P18 жоғары жылдамдықты болаттан жасалған кескіш құралдар таңдалды. VK8 қорытпасы жоғары қаттылықты жоғары температурада жоғары беріктікпен біріктіреді. Бұл қорытпаның жоғары жылу өткізгіштігі құралдың айрықша қасиеті болып табылады, өйткені ол тез жергілікті термиялық жұмсартуға бейімділікті төмендетеді. P18 болатының тозуға төзімділігі жоғары, беріктігі жеткілікті және ыстыққа төзімді.

Карбидті кескіш құралдың кесу температурасы мен кернеу күйін болжау кезінде соңғы элементтер әдісінің тиімділігі көрсетілген.

Кесу процесінде пайда болатын температура өрістерін білу құралдың қызмет ету мерзімін ұзартуға және өндіріс шығындарын азайтуға бағытталған жаңа технологияларды өзірлеу үшін өте маңызды. Кесу күші кесу жүктемесінің негізгі түрі ретінде қарастырылады. Карбидті кесу құралындағы температураны бөлу SolidWorks Simulation аналитикалық бағдарламалық жасақтамасын қолдану арқылы жүзеге асырылады. Модель SolidWorks Simulation-да тор түрінде жасалады және кесу күші беріледі. Осы мәліметтер арқылы кесу құралын жатқызуға болатын өндіріс процесінің құрамдас бөлігінің температурасы мен кернеуін анықтауға болады. Осылайша, температура мен кернеуді зерттеу Solidworks Simulation көмегімен жүзеге асырылады. Алынған нәтижелерді кесу құралының қызмет ету мерзімін және өңделетін бөліктің тұтастығын болжау кезінде пайдалануға болады.

Түйін сөздер: кесумен өңдеу, кесудің жылу құбылыстары, тозу, кернеулі деформацияланған күй, соңғы элементтер әдісі, Solidworks Simulation.

Abstract. It is known that when cutting, the machining of the cutting tool turns into heat. Heat generation is one of the causes of accelerated tool wear.

The purpose of this study is to use the finite element method to investigate the effect of temperature on the condition of tools in the process of cutting metal materials with turning cutters.

Cutting tools made of hard alloy VK8 and high-speed steel P18 were selected for the study. VK8 alloy combines high hardness with high strength at elevated temperatures. The high thermal conductivity of this alloy is a distinctive feature of the tool, as it reduces the tendency to rapid local thermal softening. P18 steel has high wear resistance, sufficient strength and is resistant to heat.

The effectiveness of the finite element method in predicting the cutting temperature and the stress state of a carbide cutting tool is shown.

Knowledge of the temperature fields that arise during the cutting process is very important for the development of new technologies aimed at increasing tool life and reducing production costs. The cutting force is considered as the main type of cutting load. The temperature distribution in a carbide cutting tool is performed using the Solidworks Simulation analytical software. The model is created as a grid in Solidworks Simulation and the cutting force is set. Using this data, it is possible to determine the temperature and voltage of a component of the production process, which can include a cutting tool. Thus, the study of temperature and voltage is performed using Solidworks Simulation. The results obtained can be used to predict the service life of the cutting tool and the integrity of the workpiece.

Keywords: cutting, thermal phenomena of cutting, wear, stress-strain state, finite element method (FEM), SolidworksSimulation.

Введение. Процесс механической обработки сопровождается пластической деформацией, при которой из-за трения стружки о режущую поверхность и неспособности металла диссипировать энергию в зоне резания повышается температура. Повышение температуры отрицательно сказывается на режущем инструменте, стружке и механических свойствах обрабатываемой поверхности заготовки. Температура в зоне резания зависит от ряда и других факторов, таких как: геометрические параметры инструмента, условия резания (влажное или сухое), тип материала режущего инструмента, заготовки и параметров технологического процесса (Зубарев Ю.М., Битюков Р.Н., 2019). Однако основной эффект от повышения температуры резания заключается в увеличении напряжения, которое неизбежно возникает на режущем инструменте из-за высоких деформаций. Эти напряжения оказывают усталостное разрушающее действие на инструмент.

Определение максимальной температуры в процессе обработки и ее распределение по рабочей поверхности немаловажный фактор, влияющий на срок службы инструмента и качество обрабатываемой детали. Энергия, затрачиваемая на резание металла в процессе токарной обработки, в основном преобразуется в тепло. Непрерывные или стационарные

операции обработки, такие как ортогональное резание, изучаются путем моделирования теплопередачи между инструментом и стружкой в зоне контакта режущей поверхности инструмента.

Температура, возникающая на поверхности режущей пластины при соприкосновении её с обрабатываемой деталью, называется температурой режущего инструмента.

Было предпринято несколько попыток предсказать и измерить температуры, используя различные методы и программы (Алинтас Й., 2012; Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г., 2014). Температура находится в стадии разработки во время резки, это вызывает большую неопределенность, поскольку нагрев в основном зависит от контакта между инструментом и стружкой, от величины силы резания и трения между инструментом и стружкой. Почти вся вырабатываемая тепловая энергия передается режущему инструменту и материалу обрабатываемой детали, в то время как тепло рассеивается через стружку. Во время механической обработки процесс деформации сильно концентрируется в очень небольшой зоне, и температура, возникающая в зоне деформации, влияет как на обрабатываемую деталь, так и на инструмент. Износ инструмента, срок службы инструмента, обрабатываемая деталь, высокие температуры резания оказывают сильное влияние на целостность поверхности и механизм образования стружки и способствуют термической деформации режущего инструмента, которая считается основным источником ошибок в процессе обработки.

Различают три зоны, которые являются источниками тепла при резании: зона первичной или основной пластической деформации, вторая зона на стыке стружки и инструмента, где происходит вторичная пластическая деформация из-за трения между нагретой стружкой и инструментом, и третья зона, где выделяется тепло, находится на боковых поверхностях, где происходит фрикционное истирание.

Увеличение температуры материала заготовки в зоне первичной деформации размягчает материал, тем самым уменьшая усилие резания и энергию, необходимую для дальнейшего сдвига. Степень нагрева инструмента и стружки влияет на контактный процесс, на условие трения, что приводит к изменению характера и локальности первичной и вторичной деформаций. В зоне вторичной деформации стружка, преодолевая трение скольжения в зоне сопряжения инструмента и стружки, деформируется, создавая дополнительное тепло. При резании возникают контакт и трение между боковой поверхностью инструмента и только что обработанной поверхностью заготовки. Работа преодоления этого трения усиливает нагрев зоны третичной деформации. Причин нагрева во всех трех зонах множество: это физические и химические свойства материала обрабатываемой заготовки и режущего инструмента, условия резания, геометрия режущего инструмента, износ рабочей поверхности резца. Тепло отводится из первичной, вторичной и третичной зон конвекцией, стружкой, инструментом и обрабатываемой деталью. Тем не менее все виды источников тепла нагревают режущий инструмент и косвенно влияют на распределение температуры на рабочей поверхности инструмента, на поверхности стружки на границе раздела инструмент-стружка.

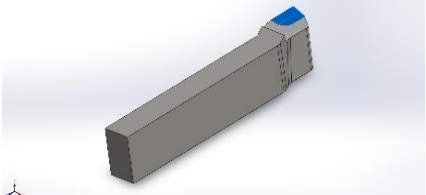
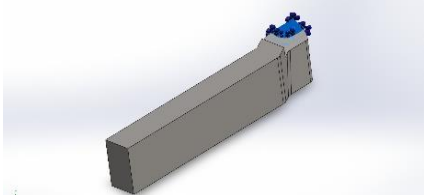
Экспериментальная часть. Температура режущего инструмента, как правило, относится к наиболее важному технологическому параметру в процессах механической обработки из-за их существенного влияния на качество конечной продукции. Большое количество взаимосвязанных параметров обработки оказывает большое влияние на температуру режущего инструмента, поэтому довольно сложно разработать подходящую теоретическую модель для эффективного и точного описания процесса обработки. Задача – исследовать влияние имитационного моделирования на конечно-элементный анализ резца, основанный на характеристиках материала твердосплавной пластины ВК8 и быстрорежущей стали P18.

Для исследования использовали токарный подрезной резец с напаянной твердосплавной пластиной ВК8 и быстрорежущей сталью Р18.

В качестве заготовки для испытания инструмента применялся цилиндрический пруток из низкоуглеродистой стали марки Ст3. Перед началом обработки все образцы имели одинаковые размеры: длина – 180 мм, диаметр – 40 мм. Установленные параметры резания включали подачу 0,5 мм/об, частоту вращения шпинделя 600 об/мин и глубину резания 1 мм. Проведённые расчёты показали, что при таких условиях величина осевой силы резания составляет 45,24 Н, радиальной – 13,57 Н, а тангенциальной – 9,05 Н.

Держатель резца выполнен из стали 40Х. Сечение резца $h \times b$ – 25 x 20 мм, пластина с толщиной 4 мм, длиной 16 мм (рис. 1, 2). Информация о режущих материалах представлена в табл. 1.

Таблица 1. Свойства материалов режущих инструментов

Наименование модели	Свойства
 Подрезной резец	Название: ВК8 Теплопроводность: 85 Вт/(м·К) Удельная теплоемкость: 200 Дж/(кг·К) Плотность: 14 500 кг/м³
 Подрезной резец	Название: Р18 Теплопроводность: 38 Вт/(м·К) Удельная теплоемкость: 460-500 Дж/(кг·К) Плотность: 7 300 кг/м³-8 100 кг/м³
Примечание – составлено авторами (Рахымтай Н.Н., Сейтказенова К.К. 2024)	

ВК8 – распространенный твердый сплав вольфрамовой группы, содержащий в своем составе 91,7 % вольфрама, 7,4-8 % кобальта, 0,6-0,66 % углерода, не более 0,3 % железа. Твердый сплав обладает свойствами прочного и износостойкого материала, не теряющего свои свойства при нагреве до 1100 °С, обладает высокой теплопроводностью (Кожевников Д.В., Кирсанов С.В., 2012). Твердость сплава HRC88. Вязкость 35 кДж/м².

Р18 – инструментальная быстрорежущая сталь, широко используемая для изготовления режущих инструментов. Сталь содержит следующие компоненты: 17,5–18,5 % вольфрама (W), 3,8–4,4 % хрома (Cr), 1–1,5 % ванадия (V), до 0,3 % молибдена (Mo), а также углерод в пределах 0,7–0,8 %, оставшуюся часть сплава составляет железо (Fe). Такой состав обеспечивает высокую стойкость к износу, прочность и устойчивость к нагреву, что делает сплав Р18 отличным для высокоскоростного резания.

Чтобы узнать напряжение пластины, экспериментально осуществили термическое исследование резца в процессе резки. Для этого провели статическое исследование в SolidWorks Simulation. SolidWorks Simulation основан на методе конечных элементов, определяющем механическую прочность режущего инструмента, а также проверяющем теплопередачу и устойчивость к изгибу.

Сетка, видимая на модели, необходима для выполнения численных расчетов методом конечных элементов (Finite Element Method, FEM) (рис. 3). В данном случае сетка

применяется для моделирования теплопередачи и напряжений в резце. Это позволяет понять, как температура распределяется в разных зонах инструмента во время работы.

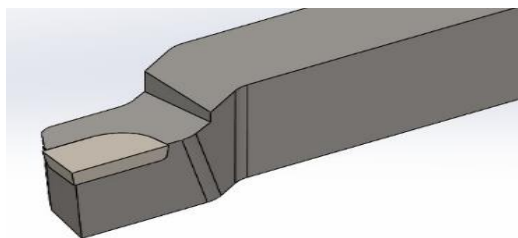


Рисунок 1. Токарный подрезной резец с пластиной из твердого сплава ВК8

Примечание – составлено авторами (Рахымтай Н.Н., Сейтказенова К.К. 2024)

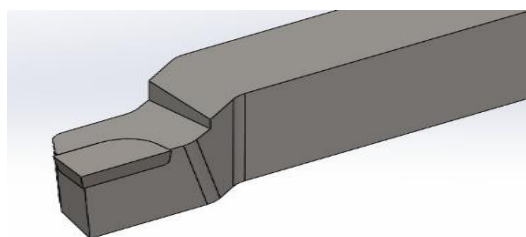


Рисунок 2. Токарный подрезной резец с пластиной из быстрорежущей стали P18

Примечание – составлено авторами (Рахымтай Н.Н., Сейтказенова К.К. 2024)

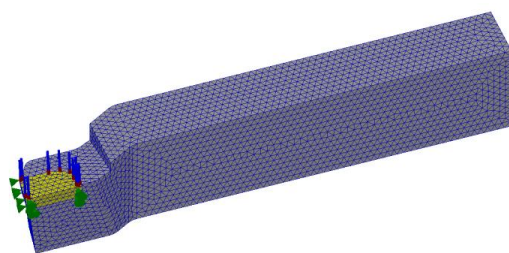


Рисунок 3. Сетчатая модель (составлена авторами)

Примечание – составлено авторами (Рахымтай Н.Н., Сейтказенова К.К. 2024)

Для охлаждения на высокоскоростных токарных и фрезерных операциях использовали полусинтетическую смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ) ПЭ-22. Полусинтетические СОЖ лучше проводят тепло, чем обычные эмульсионные масла, так как содержат меньше минерального масла.

Основные характеристики масла ПЭ-22 (Худобин Л.В., Булыжев Е.М., 2013):

Минеральное масло с добавками для улучшения охлаждающих и смазывающих свойств. Основные свойства:

- теплопроводность: 0.12–0.15 Вт/(м·К);
- теплоемкость: 1.8–2.1 кДж/(кг·К);
- кинематическая вязкость: в диапазоне 25–50 мм²/с при 50°C;
- температура вспышки: 180–200°C;
- температура застывания: не выше -10°C.

Поверхность головки охлаждается жидкостью, за исключением площади соприкосновения режущей пластины.

- начальная температура: 20°C;
- коэффициент конвекции: 7 Кал/(с·см²·°C);
- скорость течения жидкости приняли равной 0,2 м/с.

Model name: С6орка
Study name: Thermal 1(-Default-)
Plot type: Thermal Thermal 1
Time step: 1

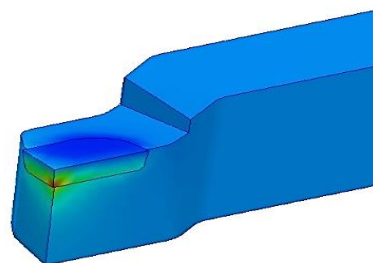
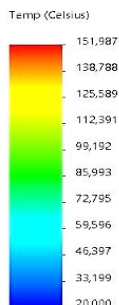


Рисунок 4. Температура пластины резца из твердого сплава ВК8 с охлаждением маслом ПЭ-22 (составлен авторами)

Примечание – составлено авторами (Рахымтай Н.Н., Сейтказенова К.К. 2024)

При проведении исследования получили приемлемую температуру для данной пластины ВК8: 151,987°C (рис. 4). При резании с твердосплавной пластиной ВК8 и охлаждением маслом ПЭ-22 температура пластины может находиться в диапазоне 150-300 °С.

Для быстрорежущей стали Р18 с маслом ПЭ-22 температура около 200-250 °С может считаться хорошим результатом при оптимальных режимах резания и эффективном охлаждении (рис. 5).

Model name: С6орка
Study name: Thermal 1(-Default-)
Plot type: Thermal Thermal 1
Time step: 1

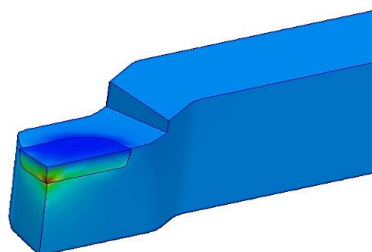
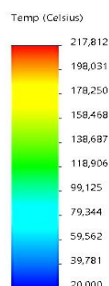


Рисунок 5. Температура пластины из быстрорежущей стали Р18 (составлен авторами)

Примечание – составлено авторами (Рахымтай Н.Н., Сейтказенова К.К. 2024)

Благодаря высокой теплопроводности и теплостойкости твердосплавная пластина быстрее проводит тепло, что обеспечивает более эффективное охлаждение. Температура на её поверхности остаётся ниже. Пластина из ВК8 имеет меньшую температуру благодаря лучшей теплопроводности и взаимодействию с охлаждающей жидкостью.

Из-за низкой теплопроводности пластина из Р18 медленнее передаёт тепло СОЖ, сильнее нагревается, и локальная температура в зоне резания выше даже при использовании масла.

Без охлаждения температура резца из ВК8 и P18 при резании может значительно различаться из-за разных теплопроводных и термостойких свойств этих материалов:

1. Твердый сплав ВК8: может эффективно отводить тепло благодаря высокой теплопроводности, но при высоких нагрузках температура на его поверхности может достигать 600-800 °С, а в крайних случаях даже 1000°С. Это может привести к износу материала и снижению его производительности.

2. Быстрорежущая сталь P18: P18, имея более низкую теплопроводность, удерживает больше тепла, что делает поверхность материала более горячей при тех же условиях. Без охлаждения температура на его поверхности может достигать 700-900 °С, а в некоторых случаях даже 1000 °С, что приводит к быстрому износу материала и потере твердости.

Таким образом, температура резцов из ВК8 и P18 без охлаждения может достигать 600–1000 °С, при этом P18 обычно будет иметь немного более высокую температуру из-за меньшей теплопроводности.

Для определения возникающих напряжений в твердосплавной пластине ВК8 при температуре 151,987 °С под воздействием охлаждающего масла ПЭ-22 (рис. 6) потребуется учесть:

1. Коэффициент теплового расширения (КТР) ВК8;
2. Модуль упругости (Е) для ВК8;
3. Температурное изменение материала (разница между исходной температурой и температурой нагрева);
4. Условия закрепления пластины, и в связи с этим возникающие ограничения деформации.

Model name: Срепка2 (2)
Study name: Static 1(-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1

von Mises (N/mm^2 (MPa))

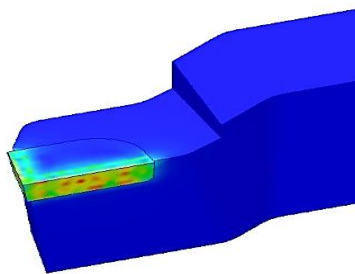
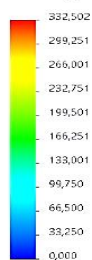


Рисунок 6. Термическое напряжение пластины твердого сплава ВК8 при температуре 151.987 °С составляет 332,502 МПа

Примечание – составлено авторами (Рахымтай Н.Н., Сейтказенова К.К. 2024)

Для расчета термических напряжений (σ) можно использовать формулу (Астахов, В.П., 2006):

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

где: - σ - термическое напряжение, [Па];

- E - модуль упругости ВК8, [Па];

- α - коэффициент теплового расширения ВК8, [1/°С];

- ΔT - изменение температуры, [°С].

Необходимые данные для ВК8:

- модуль упругости (E): около 600 ГПа (600×10^9 Па);

- коэффициент теплового расширения (α): $4.5 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$;
- изменение температуры (ΔT): $151.987^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 131.987^\circ\text{C}$.

$$\sigma = 600 \times 10^9 \text{ Па} \times 4.5 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C} \times 131.987^\circ\text{C} = 356,36 \text{ МПа}$$

При температуре $151,987^\circ\text{C}$ термическое напряжение на твердосплавной пластине ВК8 составляет около $356,36 \text{ МПа}$.

Для определения термического напряжения стали Р18 при температуре 217.812°C (рис. 7) воспользуемся той же формулой (1):

- модуль упругости (E) для стали Р18: $190 \times 10^9 \text{ Па}$;
- коэффициент теплового расширения для стали Р18: $12 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$;
- начальная температура: 20°C ;
- конечная температура: 217.812°C ;
- изменение температуры (ΔT):

$$\Delta T = 217,812 - 20 = 197,812;$$

$$\sigma_{\text{терм}} = 190 \times 10^9 \text{ Па} \times 12 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C} \times 197,812^\circ\text{C} = 451,01 \text{ МПа}.$$

Термическое напряжение стали Р18 составляет около $451,01 \text{ МПа}$ при температуре $217,812^\circ\text{C}$.

Model name: С6орка2 (2)
Study name: Static 1 (-Default-)
Plot type: Static nodal stress Stress1

von Mises (N/mm² (MPa))

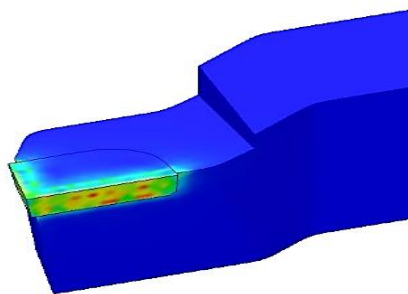
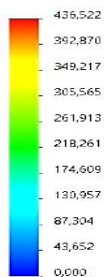


Рисунок 7. Термическое напряжение пластины из быстрорежущей стали Р18 при температуре 217.812°C составляет $436,522 \text{ МПа}$

Примечание – составлено авторами (Рахымтай Н.Н., Сейтказенова К.К. 2024)

Заклучение.

1. Быстрорежущая сталь Р18, обладающая низкой теплопроводностью и коэффициентом теплового расширения, имеет высокое термическое напряжение: при температуре $217,812^\circ\text{C}$ тепловое напряжение стали Р18 составляет $451,01 \text{ МПа}$.

2. Термическое напряжение в твердосплавной пластине ВК8 при температуре $151,987^\circ\text{C}$ составляет $356,36 \text{ МПа}$, что меньше, чем для стали Р18. ВК8, как твердосплавный материал, имеет меньший коэффициент теплового расширения, что приводит к меньшему напряжению при той же температуре. Кроме того, твердосплавные материалы, как правило, обладают большей стойкостью к термическим воздействиям и лучшими механическими свойствами при высоких температурах.

3. Сталь Р18 при температуре $217,812^\circ\text{C}$ подвергается большому термическому напряжению, что может свидетельствовать о большем риске повреждения или износа при перегреве или быстром охлаждении.

4. Несмотря на высокую твердость и прочность, твердый сплав ВК8 испытывает низкое тепловое напряжение при 151,987 °С, что свидетельствует о его термостойкости и способности работать при высоких температурах без риска повреждения.

5. Исследование температуры в зоне резания методом конечных элементов (МКЭ) во время токарной обработки является эффективным методом анализа тепловых процессов, происходящих во время резки. Этот метод позволяет получить подробную информацию о распределении температуры, что важно для понимания влияния различных параметров обработки на состояние инструмента и детали.

6. Температуры 151,987 °С для твердосплавной пластины ВК8 и 217,812 °С для быстрорежущей стали Р18 выглядят более надежными при охлаждении тем же маслом ПЭ-22 и могут быть объяснены следующими факторами:

- различием в теплопроводности: твердый сплав ВК8 имеет более высокую теплопроводность, что позволяет ему быстрее отводить тепло. Масло ПЭ-22 помогает эффективно охлаждать ВК8, снижая его температуру. Напротив, быстрорежущая сталь Р18 с более низкой теплопроводностью удерживает больше тепла на поверхности, что объясняет более высокую температуру.

- теплостойкостью материалов: ВК8 обладает лучшей теплостойкостью и может работать при высоких температурах без значительного изменения свойств. Быстрорежущая сталь Р18, хотя и предназначена для работы при высоких температурах, нагревается сильнее, поскольку отвод тепла происходит медленнее.

- эффективностью охлаждения: масло ПЭ-22 с высокой теплоемкостью и низкой вязкостью способствует более интенсивному охлаждению, особенно для материалов с хорошей теплопроводностью, таких как ВК8.

Таким образом, различия температур и напряжений между ВК8 и Р18, которые составляют около 66°С и 95МПа, являются корректным и ожидаемым результатом, учитывая физические свойства материалов и применение масла ПЭ-22. Эти данные могут соответствовать реальной картине температурного распределения, особенно при одинаковых режимах резания.

Данная работа продемонстрировала доступность результатов измерения температуры инструмента, полученных с помощью вышеупомянутых конечно-элементных моделей. Используя методы конечных элементов, можно эффективно прогнозировать и режим износа инструмента. Этот метод получил развитие как новый метод тестирования режущих материалов, сокращающий время резания, цикл разработки и снижающий затраты.

Список литературы

- Алямовский А.А. (2010) Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation: электрон.текстовые данные. – М.: ДМК Пресс, 464// Alyamovskiy A.A. (2010) Inzhenernyye raschety v SolidWorks Simulation: elektron. tekstovyye dannyye. – М.: ДМК Press, 464.
- Зубарев Ю. М., Битюков Р. Н. (2019) Основы резания материалов и режущий инструмент / Под ред. Косяковой У. А. - СПб.: Лань. - 228: ил. - Учебники для вузов. ISBN 978-5-8114-4012-2 // Zubarev YU. M., Bitukov R. N. Osnovy rezaniya materialov i rezhushchiy instrument (2019) / Pod red. Kosyakovoy U. A. - SPb.: Lan. - 228: il. - Uchebniki dlya vuzov. ISBN 978-5-8114-4012-2
- Аврамова Т.М., Бушуев В.В., Гиловой Л.Я. (2023) Металлорежущие станки: учебник. – М.: Инновационное машиностроение, – 608 // Avraamova T.M., Bushuyev V.V., Gilovoy L.YA. (2023) Metallorezhushchiye stanki: uchebnik. – М.: Innovatsionnoye mashinostroyeniye, – 608
- Алентас, Й. (2012) «Автоматизация производства: механика резки металла». - Издательство Кембриджского университета. - 400//Alintas, Y.(2012) «Avtomatizatsiyaproduktstva: mekhanikarezkimetalla». - Izdatel'stvoKembriджskogouniversiteta, - 400
- А.А. Клопотов, В.А. Литвинова, Н.М. Кондратьева, Р.А. Козырева (2016) Металлорежущие станки и инструменты. Физические основы процесса резания: учебное пособие – Томск. – 116. ISBN 978-5-93057-764-8// A.A. Klopotov, V.A. Litvinova, N.M. Kondrat' yeva, R.A. Kozyreva (2016) Metallorezhushchiye stanki i instrumenty. Fizicheskiye osnovy protsessa rezaniya: uchebnoye posobiye – Tomsk. – 116. ISBN 978-5-93057-764-8

- Ковшов, А. Н. (2016) Технология машиностроения [Электронный ресурс] : учебник. – Москва: Лань". - 320. ISBN 978-5-8114-0833-7 // Kovshov, A. N. (2016) Tekhnologiya mashinostroyeniya [Elektronnyy resurs] : uchebnik. - Moskva : Lan". - 320. ISBN 978-5-8114-0833-7
- Сушил Д.Г. (2014) «Измерение температуры режущего инструмента в процессе токарной обработки с использованием термодатчика инструмента», IJRET, ISSN: 2319-1163, том 3, выпуск 4, стр. 831-835 // Sushil D.G. (2014) «Izmereniye temperatury rezhushchego instrumenta v protsesse tokarnoy obrabotki s ispol'zovaniyem termopary instrumenta», IJRET, ISSN: 2319-1163, tom 3, vypusk 4, str. 831-835.
- Г.А. Мелентьев, А.Г. Схиртладзе, В.П. Борискин (2019) Резание материалов. Учебник. – М.: Юрайт. - 512. ISBN: 978-5-94178-135-5 // G.A. Melent'ev, A.G. Shirtladze, V.P. Boriskin (2019) Rezanie materialov. Uchebnik. – M.: Ūrajt. - 512. ISBN: 978-5-94178-135-5
- Кожевников Д.В., Гречишников В.А., Кирсанов С.В., Григорьев С.Н., Схиртладзе А.Г. (2014). Режущий инструмент: учебник для вузов / Под общ. ред. С.В. Кирсанова. М.: Машиностроение, 520 // Kozhevnikov D.V., Grechishnikov V.A., Kirsanov S.V., Grigor'yev S.N., Skhirtladze A.G. (2014). Rezhushchiy instrument: uchebnik dlya vuzov / Podobshch. red. S.V. Kirsanova. M.: Mashinostroyeniye, 520
- Кожевников Д.В., Кирсанов С.В. (2012). Резание материалов. – М.: Машиностроение, - 304 // Kozhevnikov D.V., Kirsanov S.V. (2012). Rezanie materialov. - M.: Mashinostroyeniye. - 304
- Энтеллис С. Г., Берлинер Э. М. (2022) Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник. – М.: Машиностроение, - 496 // Entelis S. G., Berliner E. M. (2022) Smazочно-okhlazhdayushchiye tekhnologicheskiye sredstva dlya obrabotki metallov rezaniyem: spravochnik. – M.: Mashinostroyeniye, - 496.
- Маркович А.С. (2016). «Тепловые процессы при резании металлов». - Екатеринбург: УГАТУ, - 345 // Markovich A.S. (2016). «Teplovyye protsessy pri rezanii metallov». - Yekaterinburg: UGATU, - 345
- Чемборисов, Н.А. (2017) Резание материалов. Режущий инструмент. Учебник. - М.: Юрайт. – 264. ISBN: 978-5-534-02278-0 // Chemborisov, N.A. (2017) Rezanie materialov. Rezhushchiy instrument. Uchebnik. - M.: Yurayt. – 264. ISBN: 978-5-534-02278-0
- Худобин Л.В., Булыжев Е. М. (2013) Технологии и техника применения смазочно-охлаждающих жидкостей при механической обработке. — М.: Издательство МГТУ, — 276 // Khudobin L.V., Bulyzhev Ye. M. (2013) Tekhnologii i tekhnika primeneniya smazочно-okhlazhdayushchikh zhidkostey pri mekhanicheskoy obrabotke. — M.: Izdatel'stvo MGTU, — 276
- Тейлор, Р., и Хуан, Ю. (2021). «Численное моделирование тепловыделения при токарных операциях». Вычислительная материаловедение, 187, 110206. // Teylor, R., iKhuan, YU. (2021). «Chislennoye modelirovaniye teplovydeleniya pri tokarnykh operatsiyakh». Vychislitel'nayamaterialovedeniye, 187, 110206.
- Чен, Г., и Го, Ю. (2019). «Моделирование нагрева и износа инструмента при высокоскоростной обработке». Журнал «Наука и техника производства», 141(3), 1-12. // Chen, G., iGo, YU. (2019). «Modelirovaniye nagreva i iznosa instrumenta pri vysokoskorostnoy obrabotke». Zhurnal «Nauka i tekhnika proizvodstva», 141(3), 1-12, <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5>

Information about authors

Rakhymtay Nursaya Nurgalikyzy – Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan. E-mail: saya_rakhumtay@mail.ru

Myrzaliyev Darkhan Saparbaevich – candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Faculty of mechanics and oil and gas business, NAO «South Kazakhstan University named after M. Auezov», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan. E-mail: darkhan-m7@mail.ru

Seitkazenova Kazira Kameshovna – Doctor of Technical Sciences, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan University», Shymkent, Kazakhstan. E-mail: kseitkazi@mail.ru,

Kadirov Nurdaulet Adyrbaevich – Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan University», Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan. E-mail: kadirovnurdaulet1010@gmail.com

Seidullayeva Oryngul Bakhytkyzy – Doctoral student in Mechanical Engineering, Faculty of Mechanics and Oil and Gas Engineering, NAO «M. Auezov South Kazakhstan University», Faculty of Mechanics and oil and gas engineering, Shymkent, 160016, Republic of Kazakhstan. E-mail: oryngkul_s@mail.ru

ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС
ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО
ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_71
IRSTI 67.21.17 :73.31.11

A.O. Sagybekova^{1,2}, D.M. Mukashev², B.A. Kutlumuratov²

¹N. Isanova Kyrgyz Civil Engineering Institute, applicant.

²L.B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty c., Kazakhstan

E-mail: sao-81@mail.ru*

E-mail: danik_2001@inbox.ru

E-mail: baybosin1994@mail.ru

ENGINEERING-GEOLOGICAL FEATURES OF ROCKS CAUSING LANDSLIDE HAZARDS ON SECTIONS OF MOUNTAIN ROADS

АВТОМОБИЛЬ ЖОЛДАРЫНЫҢ ТАУЛЫ УЧАСКЕЛЕРІНДЕ КӨШКІН ҚАУПІН ТУДЫРАТЫН ТАУ ЖЫНЫСТАРЫНЫҢ ИНЖЕНЕРЛІК-ГЕОЛОГИЯЛЫҚ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД, ВЫЗЫВАЮЩИЕ ОПОЛЗНЕВЫЕ ОПАСНОСТИ НА ГОРНЫХ УЧАСТКАХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Abstract. In the mountainous regions of Kazakhstan there are problems associated with landslides of soil masses from mountain slopes. The research of processes such as landslides and their impact on infrastructure, especially road networks, continues to be a pressing issue in mountainous regions. In various countries of the world, including Kazakhstan, the USA, Italy, Japan, Switzerland and others, landslides are one of the pressing problems. The article examines the research on problem associated with landslide processes in the mountainous regions of Kazakhstan and foreign. Also analyzes the emergence of defects on road surfaces and in the embankment structure, particularly where roads pass through mountain slopes the "Zharkent-Koktal-Arasan" road section as an example Kazakhstan. This problem is relevant, since landslides pose a threat to the safety of people and vehicles, and also provide a reliable start to the destruction of the road situation. The fact that landslides are serious phenomena, issues related to the impact of landslides on roads remain poorly studied in the road soil of Kazakhstan, which requires the need to conduct research in this area.

Special attention is given to defects such as the swelling of road surfaces, which can be explained by the movement of landslide masses that push the earth upward. This phenomenon is linked to the presence of thick layers of poorly lithified loose sedimentary deposits that have accumulated due to tectonic processes. The findings of this study will help better understand the mechanisms of landslide processes and their impact on the stability of road infrastructure. This will contribute to the development of measures to prevent and minimize the damage caused by landslides, thereby increasing the safety of road traffic in Kazakhstan's mountainous regions.

Keywords: landslides, road, mountain slopes, crack, soil.

Аңдатпа. Қазақстанның таулы аймақтарында тау беткейлерінен топырақ массаларының көшкінімен байланысты проблемалар бар. Көшкін сияқты процестерді және олардың инфрақұрылымға, әсіресе жол желісіне әсерін зерттеу таулы аймақтарда өзекті мәселе болып қалуда. Әлемнің әртүрлі елдерінде, соның ішінде Қазақстанда, АҚШ-та, Италияда, Жапонияда, Швейцарияда және т.б. көшкіндер өзекті мәселелердің бірі болып табылады. Мақалада Қазақстанның таулы аймақтарындағы және шетелдердегі көшкін процестеріне байланысты проблемаларды зерттеу қарастырылған. Сондай-ақ, Қазақстандағы Жаркент-Көктал-Арасан жол учаскесін мысалға ала отырып, әсіресе жолдар тау беткейлері арқылы өтетін жерлерде жол жабындары мен жағалау құрылыстарындағы ақаулардың пайда болуы талданады. Бұл мәселе өзекті, өйткені көшкіндер адамдар мен көліктердің қауіпсіздігіне қауіп төндіреді, сонымен қатар жол ортасын бұзудың сенімді бастапқы нүктесі болып табылады. Көшкін – күрделі

құбылыс болғандықтан, Қазақстанның жол топырақтарында көшкіндердің жолдарға әсерімен байланысты мәселелер әлі де аз зерттелген, бұл осы саладағы зерттеулерді қажет етеді. Жол жабындарының ісінуі сияқты ақауға ерекше назар аударылады, мұны жерді жоғары қарай итермелейтін көшкін массаларының қозғалысымен түсіндіруге болады. Бұл құбылыс тектоникалық процестер нәтижесінде жинақталған әлсіз тасталған борпылдақ шөгінділердің қалың қабаттарының болуымен байланысты. Бұл зерттеудің нәтижелері көшкін процестерінің механизмдерін және олардың жол инфрақұрылымының тұрақтылығына әсерін жақсы түсінуге көмектеседі. Бұл көшкіндердің залалының алдын алу және барынша азайту бойынша шараларды әзірлеуге, сол арқылы Қазақстанның таулы аймақтарында жол қозғалысы қауіпсіздігін арттыруға ықпал етеді.

Түйін сөздер: көшкін, тас жол, тау беткейлері, жарықтар, топырақ.

Аннотация. В горных регионах Казахстана существуют проблемы, связанные с оползнями грунтовых масс со склонов гор. Исследование таких процессов, как оползни и их влияние на инфраструктуру, особенно дорожную сеть, продолжает оставаться актуальной проблемой в горных регионах. В различных странах мира, включая Казахстан, США, Италию, Японию, Швейцарию и другие, оползни являются одной из актуальных проблем. В статье рассматриваются исследования проблем, связанных с оползневыми процессами в горных регионах Казахстана и за рубежом. Также анализируется возникновение дефектов на дорожных покрытиях и в конструкции насыпи, особенно там, где дороги проходят через горные склоны на примере участка дороги «Жаркент-Коктал-Арасан» в Казахстане. Данная проблема является актуальной, так как оползни представляют угрозу безопасности людей и транспортных средств, а также являются надежным началом разрушения дорожной обстановки. Поскольку оползни являются серьезными явлениями, вопросы, связанные с воздействием оползней на автомобильные дороги, остаются малоизученными в дорожных грунтах Казахстана, что обуславливает необходимость проведения исследований в этой области. Особое внимание уделено такому дефекту, как вспучивание дорожных покрытий, которое можно объяснить перемещением оползневых масс, выталкивающих землю вверх. Это явление связано с наличием мощных слоев слаболитифицированных рыхлых осадочных отложений, накопившихся в результате тектонических процессов. Результаты данного исследования помогут лучше понять механизмы оползневых процессов и их влияние на устойчивость дорожной инфраструктуры. Это будет способствовать разработке мер по предупреждению и минимизации ущерба от оползней, тем самым повысив безопасность дорожного движения в горных районах Казахстана.

Ключевые слова: оползни, автомобильная дорога, горные склоны, трещина, грунт.

Introduction. In the mountainous regions of Kazakhstan there are problems associated with landslides of soil masses from mountain slopes. Landslides are a dangerous geological phenomenon that can cause significant damage to road infrastructure, especially in mountainous areas. The impact of landslides on roads varies depending on geological conditions, climatic factors and human activity. The problem of landslides is relevant for many countries, where mountain roads and transport networks are subject to destruction as a result of these processes.

Research conducted in different countries shows the impact of landslides on transport routes and measures taken to protect them. In Kazakhstan, landslides are one of the main threats to roads. Kuchеров and Zharikov (2019) studied the geological conditions of this region, finding that the main causes of landslides are both natural factors, such as intense precipitation, and anthropogenic impacts, including road construction and deforestation. In their study, they drew attention to the importance of geotechnical surveys to prevent destruction. Salyk and Madiyev (2017), in turn, analyzed defects in road surfaces that arise as a result of landslides and proposed methods for slope strengthening and soil stabilization. In the United States, the problem of landslides is especially relevant for regions such as California, Oregon, and Washington, where intense rainfall and earthquakes can cause abrupt changes in soil conditions. Montgomery and Dietrich (1994) proposed a physically based model for predicting landslides based on the study of the water regime, soils, and tectonic movements. Wosowski and Allasia (2017) studied in more detail the impact of climate change and tectonic processes on landslides, highlighting that

changes in precipitation intensity and earthquake frequency significantly increase the probability of landslides in some regions of the United States.

Italy, with its mountainous regions, also experiences regular landslides, especially in the Alps and the Apennines. Gori and Guerriero (2016) studied the influence of geological and tectonic factors on landslide development in their study. They found that most landslides in Italy are caused by rocky slopes and earthquakes that are common in the country. Malaggini and D'Amico (2015) developed methods for monitoring and mapping landslides, taking into account their impact on road infrastructure. They proposed a protection system that includes slope stabilization using geogrids and improved drainage systems. In Japan, landslides are a serious threat, especially in areas prone to earthquakes and intense rainfall, such as the Japanese Alps and the islands of Kyushu and Honshu. Tatsuoka and Shiono (2015) show in their research how seismic activity affects slope instability, causing landslides. They also suggest using remote sensing technologies to more accurately predict these phenomena. Fujimoto and Ueda (2019) studied the geological conditions that contribute to landslides, including complex tectonic movements that create areas with high seismic activity. These studies highlight the need for regular geotechnical inspections and the adaptation of road infrastructure to changing conditions. In Switzerland, with its Alpine roads, landslides are a constant threat to the transport network. Rickenmann and Zimmermann (2016) investigated debris flows and their impact on road infrastructure in the Alps, emphasizing that these flows often cause road failures and require not only rehabilitation but also preventive measures. They proposed a forecasting and monitoring system that allows for the rapid identification of hazardous areas and the adoption of measures to prevent catastrophic consequences. The work of Grutzner and Bieri (2014) also touched upon the impact of climate change on landslide intensity, arguing that rising temperatures and more frequent precipitation accelerate slope failure processes. In China, especially on the Tibetan Plateau, landslides have a serious impact on road infrastructure. Li and Wang (2018) investigated landslide risk assessment methods in areas with difficult geological conditions and proposed approaches to minimize damage. An important part of their work was the development of a soil monitoring system that allows predicting landslide occurrence with a high degree of accuracy. Zhang and Liu (2017) add that intense seismic processes in these areas also contribute to landslides, which requires the adoption of sustainable technologies for road construction.

India, with its mountainous regions such as the Himalayas and the Western Ghats, also faces the problem of landslides. Saha and Kumar (2020) analyze the impact of landslides on the road network in the Himalayas and propose new methods for slope stabilization. Their work considers not only geological and climatic factors, but also anthropogenic ones such as deforestation and disturbance of the natural landscape. Reddy and Natarjan (2016) emphasize that effective landslide management requires the integration of geotechnical surveys and improved monitoring of weather conditions.

In Brazil, landslides are also a problem on mountain roads, especially in the Serra-Geral region. Silva and Monteiro (2015) investigated geological conditions that favor landslide occurrence, such as weak rock consolidation and high rainfall. Costa and Ribeiro (2019) proposed road protection systems, including slope stabilization with geogrids and improved drainage systems.

Materials and research methods. In regions like Kazakhstan, Japan, and Switzerland, local geological conditions – such as soil composition, moisture content, and slope angle – are key determinants of landslide risk. For instance, Denisov (1956) discusses the characteristics of clay rocks in hydraulic engineering, and their role in slope failure in specific terrains. Mustafaeu et al. (2011) add depth to this by detailing hazardous geological processes in Southeast Kazakhstan, including those caused by landslides, which often destabilize roads and embankments.

Additionally, Bondarik et al. (2007) emphasize the importance of engineering geodynamics in managing the dynamic interactions between landslides and constructed infrastructures. Understanding these interactions helps in developing better engineering solutions for road stabilization and safety.

Effective landslide management involves preventive measures like soil stabilization, drainage systems, and geotechnical monitoring. Works by Tsai et al. (1984) and Rzhnitsyn (1986) discuss methodologies for stabilizing soils and protecting infrastructures in challenging geological conditions. Khomyakov (2013) highlights the stabilization of gravelly soils in urban underground constructions in Almaty, which is relevant to cities facing similar geotechnical challenges.

Moreover, Sagybekova et al. (2019) explore coarse-grained soil testing for construction applications, providing insight into how soil testing and stabilization methods can mitigate the impact of landslides in both mountainous and urban environments.

Such phenomena are also observed on the Zharkent-Koktal-Arasan highway. Geographically, this road is confined to the Dzungarian Alatau, the southern spur of the Dolantau ridge, and the southern-facing slope. The slope slopes and exposure are the dominant factors in the formation of the landslide slope (Fig. 1, Fig. 2).



Figure 1. Landslide area (top view)

Note – compiled by the author (Sagybekova, 2024)

The geological structure of the site includes effusive formations of the Carboniferous period of different ages. These are undifferentiated Lower Carboniferous tuff deposits of medium composition, as well as tuffs and tuff lavas of the Upper and Middle Carboniferous age, represented by rocks of medium and acidic compositions. The deposits are highly dislocated and weathered, (C 2-3, m, n). In the southeast, at 300, 400 m they are overlain by loosely detrital Neogene and Paleogene deposits.

On the landslide section of this road, the landslide body is represented by coarse-grained boulder-gravel – sand formations of the Upper Quaternary and modern age (Q_{III-IV}) of deluvial-proluvial genesis.

The movement of a landslide is evolutionary in nature (slow sliding) as a result of the constant introduction of debris into the upper part of the landslide body, which, when “loaded”, presses on the lower block and moves it onto the road.

The swelling of the road surface can be partly explained by the fact that the body of the landslide, resting on the beam of the bedrock near the "tongue" of the landslide, squeezes it upward. This also partially occurs due to the action of water near the road surface, which also freezes and thaws.

Next to the road there are rows of wells-collectors, which are clogged with debris. This explains the movement of the landslide upwards and towards the Borokhudzir River. In the upper part, north-east of the landslide body, cracks of the second order of separation began to form (Fig. 2).



Figure 2. II-nd rupture crackorder in the landslide area

Note – compiled by the author (Sagybekova, 2024)

Results and their discussion. The main sliding crack has been formed for a long time (5-10 years) and is gradually increasing. The magnitude of the evolutionary shift according to the survey data does not exceed 0.6 1,1 mper year, but is constantly increasing. The granulometric composition of the landslide soils is shown in Table 1, the soils belong to the 3rd complexity category (according to mechanical development).

Table 1. Granulometric composition of landslide deposits on the Borokhudzir River

Locations	Blocks 100 1000 mm % or more	Crushed stone 10-100 mm, %	Wood chips 1-10 mm, %	Sand 0.1-10 mm, %	Aleurite, pilit <-0.1 mm, %
Upper ledge of the landslide	15	30	25	18	12
Middle part of the landslide	12	32	30	16	10
The lower part ("tongue") of the landslide	10	35	35	8	12

Note – compiled by the author (Sagybekova, 2024)

Previously conducted studies of the geological structure of the region where the Zharkent-Koktal-Arasan highway passes show that the studied slope is characterized by the predominant development of various metamorphic, sedimentary and magmatic formations of the pre-Paleozoic and Paleozoic eras. Mesozoic rocks represent large intermountain depressions. Cenozoic deposits are developed mainly in internal and intermountain depressions, erosion valleys and on mountain slopes. They are represented by crystalline schists, quartzites, and less often gneisses with interlayers of marble and amphiboles. Contrasting tectonic movements caused the formation of mountain ranges and intermountain depressions, in which powerful strata of weakly lithified loose-clastic formations accumulated.

Cobblestones taken from the floodplain of the Borokhudzir River for the purpose of using them as rubble stone revealed the following values: water absorption – 42-56%, softening coefficient – 0.56-0.70, loss of strength after 25 freezing cycles – 42-56%, temporary compressive strength of water-saturated samples – 21-55 MPa.

The rocks on the slopes of the Dzungarian Alatau mountains, where the studied section of the Zharkent-Koktal-Arasan road passes, are characterized by the following properties: for granites of medium- and fine-grained structure, the ultimate compressive strength of dry rock reaches 150-174 MPa; in a water-saturated state – 146-171 MPa, after 10 freezing cycles – 139-169 MPa; softening coefficient – 0.94; frost resistance – 0.07-0.16; water absorption – 0.18-0.32%. The given indicators characterize the rocks of all groups of Paleozoic formations as very strong (Table 2).

Table 2. Physical and mechanical properties of rocks of the metamorphic group of formations of the pre-Paleozoic and Paleozoic

Indicators	Porphyrites, quartz porphyrites and diorite porphyries	Effusives and pyroclasts, carbonate – siliceous shales	Carbonate-carbonate, carbonaceous-clayey shales
Particle density	<u>2.90-3.01</u> 2.96 (31)	<u>2.73-2.75</u> 2.74 (14)	<u>2.71-3.11</u> 2.89 (9)
Density, t/ m ³	<u>2.65-2.91</u> 2.82 (31)	<u>2.66-2.81</u> 2.72 (14)	<u>2.04-3.40</u> 2.76 (9)
Porosity, %	<u>2.4-8.6</u> 5.5 (31)	<u>0.7-0.75</u> 0.7 (14)	<u>0.7-13.8</u> 3.7 (9)
Strength limits, 10 ⁻¹ MPa: – compression	<u>2010-2899</u> 2640 (31)	<u>1180-2610</u> 1890 (17)	<u>526-3230</u> 1860 (6)
– for stretching	<u>120-183</u> 169 (27)	<u>150-291</u> 221 (11)	<u>181-266</u> 232 (6)
Angle of internal friction, degrees	<u>30-49</u> 37 (24)	<u>39-50</u> 45 (17)	<u>30-37</u> 32 (6)
Adhesion, MPa	<u>28.5-51.0</u> 38.2 (24)	<u>16.0-38.2</u> 27.2 (17)	<u>5.5-34.0</u> 0.6 (6)
Modulus of elasticity, MPa	<u>0.5-0.9</u> 0.6 (38)	<u>0.5-0.9</u> 0.8 (17)	<u>0.5-1.2</u> 0.6 (6)
Poisson's ratio	<u>0.19-0.25</u> 0.22 (38)	<u>0.18-0.30</u> 0.24 (17)	<u>0.24-0.35</u> 0.28 (6)
<i>Note – compiled by the author (Sagybekova, 2024)</i>			

The complex of Quaternary alluvial-proluvial deposits is developed at the foot of the Dzungarian Alatau mountains, on the landslide slope of the Dolantau ridge and is represented by block-crushed rock material with sandy-clay filler. Coarse-grained material is usually poorly rounded and prone to sliding. The deposit surfaces are covered by layered loams with a thickness of 5-10 m. The physical and mechanical properties of loamy rocks analyzed in the KazADI laboratory are given in Table 3.

Table 3. Physical and mechanical properties of loamy soils of the complex of Quaternary alluvial-proluvial deposits

Indicators	$a_r Q_I$	$a_p Q_{II-III}$		$a_p Q_{III-IV}$	
	Sandy loam	Sandy loam	Loam	Sandy loam	Loam
Particle density, t/m^3	<u>2.67-2.76</u> 2.68 (12)	<u>2.65-2.90</u> 2.72 (27)	<u>2.60-2.82</u> 2.73 (99)	<u>2.68-2.87</u> 2.72 (5)	<u>2.74-2.77</u> 2.75 (5)
Density, t/m^3	<u>1.28-1.53</u> 1.45 (12)	<u>1.37-1.74</u> 1.51 (27)	<u>1.29-1.84</u> 1.51 (99)	-	<u>1.44-1.64</u> 1.50 (5)
Skeletal density, t/m^3	<u>1.26-1.52</u> 1.44 (12)	<u>1.33-1.67</u> 1.47 (27)	<u>1.09-1.77</u> 1.43 (99)	<u>1.14-1.81</u> 1.45 (5)	<u>1.35-1.46</u> 1.40 (5)
Porosity, %	<u>44-52</u> 47 (12)	<u>38-50</u> 45 (24)	<u>35-59</u> 47 (99)	-	<u>47-51</u> 49 (5)
Moisture content at yield point, %	-	<u>20-24</u> 22 (16)	<u>22-38</u> 26 (99)	<u>18-41</u> 29 (5)	<u>26-29</u> 27 (5)
Plasticity index, %	-	<u>3-7</u> 26 (9)	<u>6-17</u> 10 (99)	<u>0.8-7.0</u> 4 (5)	<u>10-12</u> 23 (5)
Angle of internal friction, degrees:	-	<u>25-27</u> 26 (9)	<u>7-48</u> 25 (52)	<u>8-31</u> 23 (5)	-
– at natural humidity	-	-	<u>7-25</u> 18 (56)	-	-
– with soaking in water	-	-	<u>0.04-1.60</u> 0.94 (50)	<u>0.08-1.35</u> 0.38 (5)	-
Adhesion, 10^5 , MPa:	-	-	<u>0.04-0.75</u> 0.30 (54)	-	-
– at natural humidity	-	-	-	-	-
– with soaking in water	-	-	-	-	-

Note – compiled by the author (Sagybekova, 2024)

Elimination of one of the main causes of landslides, changes in the stress state of clay rocks, can be achieved by leveling the slopes. On gentle slopes or embankments there will be no pressure drop, which means there will be no clay flow. This creates the need to move earth masses in order to unload the upper part of the slope by cutting and to load the foot of the slope. If it is impossible to cut the upper part of the slope, it is necessary to load the foot of the slope; for this purpose, an earthen bench is poured in the place of possible uplift of the foundation.

The specified measures can be correctly designed only with verification calculations of the slope stability coefficient n . First of all, it is necessary to calculate n of the slope before the construction of the road, and then check the value of n after filling the embankment or driving the excavation.

To calculate the coefficient of stability of a slope composed of heterogeneous soil layers, it is recommended to use the Maslov- Behrer horizontal force method. This method allows one to

graphically or analytically determine the active soil pressure within a selected block as on a retaining wall with a vertical rear edge and with a sliding surface inclined to the horizon. The friction of the face is not taken into account.

The calculation is made according to the following formulas:

$$H = P \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

where H is the pressure on an imaginary wall in the absence of friction and adhesion in the soil;

P – weight of the calculation block;

α – the slope of the sliding surface to the horizon (the sign of the angle function α determined in accordance with trigonometric rules).

$$R = P \operatorname{tg} (\alpha - \varphi_p) \quad (2)$$

where R is the unquenched part of the pressure (active pressure); φ_p – angle of shear resistance at stress p .

Thus, knowing the value of the angle of internal friction φ , the adhesion c from laboratory tests and the stress p , the value of the angle of resistance to shear is calculated. Then the part of the total pressure on the imaginary wall that is perceived by friction and adhesion in the soil is calculated T :

$$T = H - R = P [\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} (\alpha - \varphi_p)]. \quad (3)$$

Conclusion.

The combined knowledge from these references offers a solid foundation for understanding landslide hazards and their management in various countries. By integrating geotechnical engineering practices and landslide risk assessments, it's possible to mitigate the impacts on road infrastructure and urban development, especially in seismically active or geologically unstable regions. In the mountainous regions of Kazakhstan there are problems associated with landslides of soil masses from mountain slopes. Such phenomena are also observed on the Zharkent-Koktal-Arasan highway. Geographically, this road is confined to the Dzungarian Alatau, the southern spur of the Dolantau ridge, and the southern-facing slope.

Thus, the calculation by the method of a circular cylindrical surface is reduced to finding (by selection) the most dangerous sliding surface. In practice, the calculation is carried out by a circular cylindrical surface (the method of K. Terzaghi).

References

- Kucherov, A., & Zharikov, A. (2019). "Landslides in the Mountainous Regions of Kazakhstan and Their Impact on Road Infrastructure." *Geological Journal of Kazakhstan*, 24(2), 134-145.
- Salyk, A., & Madiyev, T. (2017). "Geological Hazards and Landslide Events in the Mountainous Areas of Kazakhstan." *Bulletin of the Earth Sciences Institute*, 19(3), 78-89.
- Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). "A Physically-Based Model for Landslide Initiation." *Water Resources Research*, 30(4), 1153-1172. <https://doi.org/10.1029/93WR03784>
- Wasowski, J., & Allasia, P. (2017). "Landslide Hazard and Risk in the United States: A Review." *Geological Society of America Bulletin*, 129(1-2), 243-265.
- Gori, S., & Guerriero, L. (2016). "Landslide Occurrence and the Role of Geology in the Italian Peninsula." *Landslides*, 13(5), 973-986. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0724-7>
- Malagnini, L., & D'Amico, S. (2015). "Mapping and Monitoring Landslides in the Italian Apennines: Geotechnical Impacts on Road Infrastructure." *Geotechnical Engineering*, 43(3), 78-92.
- Tatsuoka, F., & Shiono, M. (2015). "Landslides and Geotechnical Investigations on Roads in Mountainous Regions of Japan." *Journal of Landslide Research*, 10(1), 58-72. <https://doi.org/10.3311/JLR.2015.10.1.58>

- Fujimoto, T., & Ueda, Y. (2019). "Geological Conditions and Slope Stability in Japan's Mountainous Areas." *Geological Survey of Japan Report*, 52, 115-132.
- Grützner, C., & Bieri, K. (2014). "Landslides in Switzerland: Analysis of the Causes and Their Impact on Transport Networks." *Swiss Journal of Geosciences*, 107(3), 485-502. <https://doi.org/10.1007/s00015-014-0182-7>
- Rickenmann, D., & Zimmermann, M. (2016). "Landslides and Debris Flows in the Swiss Alps: Understanding Processes and Hazards." *Swiss Geotechnical Journal*, 44(2), 89-106.
- Li, X., & Wang, J. (2018). "Landslide Hazard Evaluation and Mitigation in China: A Case Study of Road Infrastructure in the Tibetan Plateau." *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 40(3), 295-304.
- Zhang, J., & Liu, X. (2017). "Geological Hazards in Mountain Roads of China: A Study on Slope Stability and Infrastructure Protection." *Journal of Mountain Science*, 14(7), 1210-1223. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4484-4>
- Saha, S., & Kumar, M. (2020). "Landslides and Their Impact on Transportation Networks in the Himalayas." *Environmental Earth Sciences*, 79(5), 163-175. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08962-x>
- Reddy, R., & Natarajan, S. (2016). "A Study on the Influence of Landslides on Road Construction in the Western Ghats of India." *Geotechnical Research Journal*, 22(4), 57-68.
- Silva, C., & Monteiro, L. (2015). "Geological and Geotechnical Conditions Leading to Landslides in the Brazilian Mountain Roads." *Brazilian Journal of Geology*, 42(2), 305-315.
- Costa, L., & Ribeiro, A. (2019). "Risk Management for Landslides in the Brazilian Highlands: Methods and Applications for Road Safety." *Journal of Engineering Geology*, 38(6), 1023-1041.
- Bae, Y., & Allen, M. (2018). "Landslide Processes in New Zealand's Steep Slopes and Their Effects on Road Infrastructure." *Geological Society of New Zealand Bulletin*, 51, 110-122.
- Hunter, J., & Duncan, M. (2017). "Geotechnical Challenges in the New Zealand Mountain Roads: An Analysis of Landslide Events." *NZ Journal of Geosciences*, 63(4), 549-561.
- Coutard, J., & Rappaz, M. (2016). "Mountain Road Stability and Landslides in the French Alps: A Geotechnical Perspective." *Journal of Engineering Geology*, 48(2), 81-95. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-0085-0>
- Rey, C., & Tazi, M. (2014). "Geohazards and Infrastructure Development in the French Pyrenees: Impact of Landslides." *Environmental Geology and Engineering*, 19(3), 145-158.
- Korkmaz, M., & Yilmaz, S. (2017). "Landslides and Their Impact on Infrastructure in the Turkish Alps." *Engineering Geology*, 217, 145-159. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.11.011>
- Ozer, A., & Karadeniz, A. (2018). "Geotechnical Investigations and Landslide Risk Assessment for Road Construction in the Eastern Anatolia Region." *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(2), 585-596.
- Solis, A., & Mendoza, A. (2017). "Landslide Hazard Mapping in the Andean Region of Peru: Implications for Road Networks." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(12), 2081-2095. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2081-2017>
- Vargas, L., & Ramos, J. (2015). "Geological and Geotechnical Conditions Affecting Landslide Risk in the Peruvian Andes." *Journal of Geotechnical Engineering*, 21(4), 45-56.
- Lee, S., & Kim, Y. (2016). "Landslide Risk Assessment and Management in the Mountainous Roads of South Korea." *Journal of Earthquake and Tsunami*, 10(1), 99-112. <https://doi.org/10.1142/S1793431116400114>
- Денисов Н.Я. Сравнительные свойства глинистых пород и их использование в гидротехническом строительстве. – М.: Госэнергоздат, 1956. – 288 с. / Denisov N.Ya. Comparative properties of clay rocks and their use in hydraulic engineering. – M.: Gosenergozdat, 1956. – 288 p.
- Мустафаев С.Т., Смоляр В.А., Буров Б.В. Опасные геологические процессы на территории Юго-Восточного Казахстана. – Алматы: Гылым, 2011. – 261 с. / Mustafaev S.T., Smolyar V.A., Burov B.V. Hazardous geological processes in the territory of South-East Kazakhstan. – Almaty: Gylym, 2011. – 261 p.
- Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярғ Л.А. Инженерная геодинамика. – М.: КДУ, 2007. – 440 с. / Bondarik G.K., Pendin V.V., Yarg L.A. Engineering geodynamics. – M.: KDU, 2007. – 440 p.
- Тер-Степанян Г.И. Геодезические методы изучения динамики оползней. – М.: изд. «Недра», 1972. – 136 с. / Ter-Stepanyan G.I. Geodetic methods for studying landslide dynamics. – M.: Publishing House "Nedra", 1972. – 136 p.

- Дранников А.М., Стрельцес Г.В., Купраш Р.П. Оползни на автомобильных дорогах. – М.: Транспорт, 1972. – 160 с. / Drannikov A.M., Streltses G.V., Kuprash R.P. Landslides on motorways. – М.: Transport, 1972. – 160 p.
- Цай Т.Н., Талалай А.Л., Сорокин В.В. и др. Методические рекомендации по проектированию организации строительства заглублённых частей объектов в сложных условиях. – М.: НИИОУС при МИСИ им. В.В. Куйбышева, 1984 г. Tsai T.N., Talalay A.L., Sorokin V.V. et al. Methodological recommendations for designing construction organizationburied parts of objects in difficult conditions. – М.: NIIOUS at MISI named after V.V. Kuibyshev, 1984.
- Ржаницын Б.А. Химическое закрепление грунтов в строительстве. – М.: Стройиздат, 1986 г. / Rzhantsyn B.A. Chemical stabilization of soils in construction. – М.: Stroyizdat, 1986.
- Конюхов Д.С. Строительство городских подземных сооружений мелкого заложения. – М.: Архитектура-С, 2005. / Konyukhov D.S. Construction of shallow urban underground structures. – М.: Architecture-S, 2005.
- Сагыбекова А. Обоснование применения и определения качественных свойств крупнообломочных грунтов // Вестник Казахского гуманитарно-юридического инновационного университета. – № 3 (43). – 2019 г. / Sagybekova A. Justification of the application and determination of qualitative properties of coarse-grained soils // Bulletin of the Kazakh Humanitarian and Legal Innovative University No. 3 (43). – 2019.
- Sagybekova A. Development of underground space in metropolitan areas. Bull. KazGASA. 2019. 3(73):199-204.
- Sagybekova AO, Tleukozhaev AS. Application of test results of synthetic products for soil stabilization in the construction of buildings and structures. Ivanovo: Publishing house "Problems of Science"; 2020.
- Khomyakov VA, Tleukozhaev AS. Features of the use of synthetic products for soil stabilization in the construction of buildings and structures. Sci. Conf. "Stud. & Sci." 2021. 2021:86-89.
- Krutov VI, Kovalev AS, Kovalev VA. Design and installation of bases and foundations on subsidence soils. Moscow: DIA Publishing House; 2016.
- Khomyakov V.A. Investigation of gravelly soil during underground construction in Almaty. Soil Mech. Found. Eng. 2013. 5:46-53.
- Ormanbekova A, Aitkazinova SK, Bek N M. Observations of deformations of engineering structures with the help of modern high-precision geodetic devices. Biosci. Biotechnol. Res. Commun. 2020. 12(5):184-195.
- Khomyakov V.A. Ensuring stability of boards of deep ditches in seismic regions. Proc. Int. Conf. Soil Mech. & Geotech. Eng. 2013. 2013:113-123. veb-prilozhenij. Vestnik nauki. – T. 2. – № 5 (14), 149-153.

Information about authors

Sagybekova Akmaral – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor L.B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, Kazakhstan. E-mail: sao-81@mail.ru, ORCID:0000-0001-5679-5816, +7 747 714 81 24

Mukashev Daniyar Melisovich – 1st year PhD student L.B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, Kazakhstan. E-mail: danik_2001@inbox.ru, <https://orcid.org/0009-0004-9344-5945>, +7 707 2579699

Kutlumuratov Baibossyn – 1st year PhD student L.B. Goncharov Kazakh Automobile and Road Institute, Almaty, Kazakhstan. E-mail: baybosin1994@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-8327-3229>, +77082872211

МҰНАЙ ӨНДЕУ
НЕФТЕПЕРЕРАБОТКА
OIL REFINING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_81
IRSTI 61.51.37

V.V. Sashitskaya¹, R.M. Nesmeyanova², S.R. Masakbaeva³

Toraighyrov University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

¹E-mail: nikasash777@mail.ru*

²E-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz

³E-mail: sofochka184@mail.ru

ANALYSIS OF TECHNOLOGIES FOR DESULFURIZATION OF COKING FEEDSTOCK AND PETROLEUM COKE

КОКСТЕУ ШИКІЗАТЫ МЕН МҰНАЙ КОКСЫН КҮКІРТСІЗДЕНДІРУ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ТАЛДАУ

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕССЕРИВАНИЯ СЫРЬЯ КОКСОВАНИЯ И НЕФТЯНОГО КОКСА

Abstract. In this article, the authors provide an overview of the properties of petroleum coke produced by «POCR» LLP, as well as calcined coke from «UPNK-PV» LLP, and the properties of coke required by the aluminum industry. Based on the presented data, an analysis of desulfurization technologies for petroleum coke and coking feedstock with maximum sulfur removal is conducted. Petroleum coke production is one of the directions for deepening oil refining. Currently, there is a trend toward declining oil quality, particularly with an increase in sulfur content. The elevated sulfur content in coking feedstock worsens the quality of petroleum coke and limits its use in electrode production. The burning of high-sulfur coke in furnaces leads to equipment corrosion and the release of sulfur gases into the atmosphere, resulting in environmental problems. In one of the primary applications of petroleum coke in the aluminum industry, the sulfur content requirement is 1.5 %, whereas petroleum coke from «POCR» LLP contains 2.5-3.5 % sulfur. To improve the quality of raw petroleum coke, «POCR» LLP utilizes calcination at «UPNK-PV» LLP, which enhances the structural and mechanical properties of the coke but only slightly reduces the sulfur content. The article discusses various methods for desulfurizing coking feedstock and petroleum coke, including calcination, hydrotreating, extraction, oxidative desulfurization, microbial desulfurization, and provides a comparative analysis of these methods. The most effective desulfurization method is also proposed based on the review.

Keywords: coking feedstock, desulfurization of heavy oil, petroleum coke desulfurization, desulfurization methods, oxidative desulfurization.

Аңдатпа. Бұл мақалада авторлар «ПМХЗ» ЖШС-нің мұнай коксы мен «УПНК-ПВ» ЖШС-нің күйдірілген коксының қасиеттеріне, сондай-ақ алюминий өнеркәсібінің кокске қоятын талаптарына шолуды ұсынады. Ұсынылған деректерді ескере отырып, күкіртті мүмкіндігінше көп мөлшерде кетіру арқылы мұнай коксын және кокс өндіруге арналған шикізатты күкіртсіздендіру технологиялары талданды. Мұнай коксын өндіру мұнайды терең өңдеудің бір бағыты болып табылады. Қазіргі уақытта мұнай сапасының нашарлауы күкірттің мөлшерінің артуымен байланысты болады. Кокстеу шикізатындағы күкірттің жоғары мөлшері мұнай коксының сапасын нашарлатып, оны электродтар өндіруде пайдалануды шектейді, ал жоғарыкүкіртті коксты пештерде жағу жабдықтаудың коррозиясына және атмосфераға күкіртті газдардың бөлінуіне әкеліп, экологиялық проблемалар тудырады. Мұнай коксының негізгі қолдану салаларының бірі болатын алюминий өнеркәсібіндегі күкірттің құрамына қойылатын талап 1,5 % құрайды, ал «ПМХЗ» ЖШС кәсіпорнында өндірілетін мұнай коксында күкірттің мөлшері 2,5-3,5 % қамтиды. «ПМХЗ» ЖШС шикі мұнай коксының сапасын жақсарту үшін «УПНК-ПВ» ЖШС-да коксты күйдіру көзделген, бұл мұнай коксының құрылымдық-механикалық қасиеттерін жақсартады, бірақ күкірттің мөлшерін азайту шамалы. Мақалада кокстеу шикізаты мен мұнай коксын күкіртсіздендірудің әртүрлі әдістері, соның ішінде күйдіру, гидротазарту, экстракция, күкіртсіздендірудің тотықтыру әдістері, микробтық

десульфуризация қарастырылып, олардың салыстырмалы сипаттамасы жасалған; сондай-ақ күкіртсіздендірудің қарастырылған әдістерінің небары тиімді әдісі ұсынылған.

Түйін сөздер: кокстеу шикізаты, гудронды десульфуризациялау, мұнай коксын десульфуризациялау, десульфуризация әдістері, тотықтырғыш десульфуризация.

Аннотация. В данной статье авторы представляют обзор свойств нефтяного кокса ТОО «ПНХЗ», а также прокаленного кокса ТОО «УПНК-ПВ» и свойств кокса, предъявляемых алюминиевой промышленностью. С учетом представленных данных проведен анализ технологий обессеривания нефтяного кокса и сырья коксования с максимальным удалением серы. Производство нефтяного кокса является одним из направлений углубления переработки нефти. В настоящее время наблюдается ухудшение качества нефти в сторону увеличения содержания серы. Повышенное содержание серы в сырье коксования ухудшает качество нефтяного кокса и ограничивает использование его в производстве электродов; сжигание высокосернистого кокса в печах приводит к коррозии оборудования и выделению сернистых газов в атмосферу, что влечет за собой экологические проблемы. В одной из основных областей применения нефтяного кокса в алюминиевой промышленности требование по содержанию серы 1,5 %, тогда как нефтяной кокс ТОО «ПНХЗ» содержит 2,5-3,5 % серы. Для улучшения качества сырого нефтяного кокса ТОО «ПНХЗ» предусмотрена прокатка на предприятии ТОО «УПНК-ПВ» которая улучшает структурно-механические свойства нефтяного кокса, но содержание серы значительно не понижает. В статье рассмотрены различные методы обессеривания сырья коксования и нефтяного кокса такие как прокатка, гидроочистка, экстракция, окислительные методы обессеривания, микробная десульфуризация и выполнена их сравнительная характеристика; также предложен наиболее эффективный из рассмотренных метод обессеривания.

Ключевые слова: сырьё коксования, обессеривание гудрона, обессеривание нефтяного кокса, методы обессеривания, окислительная десульфуризация.

Introduction. One of the directions of deepening oil refining is coking of heavy oil residues, but recently there has been a deterioration in the quality of crude oil and heavy oil feedstock, which increasingly contains high molecular weight hydrocarbons and heteroatomic compounds. As the content of heteroatomic compounds increases, the sulfur content increases.

Heavy oil residues are used as raw materials to make petroleum coke. They contain an increasing amount of sulfur due to the degradation of the quality of the oil feedstock, which, along with the coking feedstock, causes the coking unit to be delayed and produces low-quality petroleum coke. Petroleum coke should have a sulfur concentration of no more than 1.5% in order to be used in the electrode sector. Given that the Pavlodar region does not produce petroleum coke with such a high sulfur content, the majority of petroleum coke produced there is not suitable for use as a carbon source in metallurgy. Despite having a high specific heat of combustion, high-sulfur petroleum coke poses environmental issues when used as a fuel in the energy sector. It is worth noting that the sulfur content in petroleum coke increases during the coking process, so it is necessary to pay attention to desulfurization not only of petroleum coke, but also of coking raw materials (Sashitskaya, 2024; GOST 22898-78).

There are several methods for desulfurization of petroleum coke and coking feedstock: calcination, hydrotreating, extraction, adsorption, oxidative desulfurization.

This article aims to evaluate the desulphurization processes of coking raw materials and petroleum coke, along with their comparative characteristics. The aims of this work are:

1. To examine the qualitative attributes of coking raw materials and petroleum coke;
2. Comparative analysis of requirements to petroleum coke with regard to sulfur content from aluminium industry and quality of petroleum coke after installation of «UPNK »LLP;
- 3 Study of methods of desulfurization of coking raw materials and their comparative characterisation;
- 4 Study of methods of desulfurization of petroleum coke and their comparative characterisation.

Materials and methods. Studying the regulations of the enterprise «POCR» LLP, it was revealed that the sulfur content in the coking feedstock is not regulated. This fact leads to the fact that the raw material after the secondary processes of oil refining comes to the delayed coking unit with uncontrolled sulfur content, which negatively affects the quality of petroleum coke. Petroleum coke derived from high sulfur coking feedstock is rendered inappropriate for electrode manufacturing in the aluminium sector (Sashitskaya, 2024). Crude petroleum coke produced at the delayed coking plant undergoes calcination, enhancing its structural and mechanical characteristics while reducing moisture content and chemical impurities, including sulfur, albeit not substantially. Table 1 delineates the sulfur concentration in the crude petroleum coke of «POCR» LLP, the calcined petroleum coke of «UPNK» LLP, and the sulfur content requirements for petroleum coke in the aluminium sector (GOST 22898-78; ST TOO 001140000362-04-014-2018; Kunichanskaya, 2018).

Table 1. Information on sulfur content in crude petroleum coke of PNHZ LLP, calcined petroleum coke of UPPC LLP and sulfur content requirement from aluminium industry

Name of organisation	Sulphur content in petroleum coke
Crude coke «POCR» LLP	2,5-3,5
Purified petroleum coke «UPNK» LLP	3-3,5
Sulphur content requirement for petroleum coke from aluminium industry	1,2-1,5
<i>Note – compiled by the authors</i>	

Based on this table we can see that the local petroleum coke does not meet the requirement for petroleum coke from the aluminium industry, therefore, it is necessary to search for methods of desulfurization of coking raw materials and petroleum coke.

According to the data, the sulfur content in petroleum coke becomes higher compared to the coking feedstock. So, for example, if the sulfur content in coking raw material was 0.25 %, then in coke it becomes twice as much, and when coking raw material with 5 % sulfur content in coke remains the same. Consequently, to reduce the sulfur content in petroleum coke it is advisable to desulfurise the coking feedstock before entering the delayed coking unit (Sashitskaya, Nesmeyanova 2024)

To reduce sulfur content in coking feedstock there are the following methods: hydrotreating, absorption, extraction, biological desulfurization, oxidative desulfurization methods.

Currently, the most common method of desulfurization is hydrotreating, where sulfur-containing compounds react with hydrogen to convert them into volatile compounds. It should be noted that heavy organosulfur compounds such as alkylbenzthiophenes or dibenzthiophenes are more difficult to hydrodesulfurise as they are less reactive. To date, the efficiency of hydrogenation desulfurization methods is about 90 %. For more complete removal of sulfur it is necessary to search for the most effective methods (Fajzutdinov, 2022).

Other desulfurization methods used for desulfurization include extraction methods using diethylene glycol, sulfolane and hydrogen fluoride as extractants, sorption methods using silica gels, aluminium oxide and clay as sorbents, and biodesulfurization using microorganisms. It is worth noting the low efficiency of desulfurization with respect to such compounds as benzthiophenes and dibenzthiophenes due to their chemical stability (Stavickaya, 2015).

Oxidative desulfurization techniques involve the alteration of functional groups in sulfur compounds through the use of ozone, hydrogen peroxide, formic acid, and similar oxidative agents.

To remove sulfur from petroleum coke, calcination is currently used at local enterprises. The calcination of petroleum coke can slightly reduce the sulfur content from 3.23 to 3.14 % (Kunichanskaya, 2018).

Petroleum coke as well as tar can be desulphurised using different desulfurization methods. Table 2 shows a comparative characteristic of methods of desulfurization of petroleum coke (Askari, Khorasheh, Soltanali & Tayyedi, 2019; Chen, Ma, Wei & Wu & Li & Zhang, 2017; Gang, Qiuyun, Wei, Zhou & Qifan, 2022; Huang, Cao, Han, Lian & Zhu, 2020; Huang, Song, Yu, Ding, Zhang, Cai & Ma, 2023; Zhu, Yao, Wang, 2020).

Table 2. Comparative Characteristics of Methods for Desulfurization of Petroleum Coke

Method	Desulfurization Conditions				Desulfurization Degree, %
	Reagents	T, °C	The mass ratio of the agent and coke	Time, h	
Desulfurization with solvent extraction	o-Chlorophenol	160	10:1	2	19
	Tetrachloroethylene	s.c.	17:1	2	35
	o-Chlorophenol	s.c.	17:1	4	28,5
High-temperature desulfurization by calcination	-	1200-1400	-	4	76,4
Desulfurization with Alkali Metal Compounds	Alkali Metal Compounds	550	4:1	2	99,5
	NaOH	500	2:1	2	98,1
	NaOH	1600	2:1	2	98,5
	KOH	600	1,5:1	2	84,3
Hydrodesulfurization	Hydrogen and Catalyst	760	-	2	87,0
Microbial Desulfurization	Thiobacillus ferrooxidans	19-22	-	24	38,3
Oxidative desulfurization	H ₂ O ₂ and Carboxylic Acid	60	30	12	75
Intensified desulfurization	Using Ultrasound	-	-	-	93,6

Note – compiled by (Hung, 2023)

Based on this table we can see that the most efficient method of desulfurization is desulfurization using alkali and alkali metals, but its disadvantages are the use of high temperatures and aggressiveness of compounds, as well as the need to dispose of reagents. The use of hydrodesulfurisation also involves the use of high temperatures and pressures in the process, as well as the need for expensive catalysts and hydrogen.

At the same time, the method of oxidative desulfurization allows to remove 75 % of sulfur-containing compounds, at low temperature and harmlessness of components, as the by-product is water and sulfones dissolved in it. It is worth noting that sulphones can be used in the chemical and pharmaceutical industries and thus oxidative desulfurization methods produce by-products that can be profitable for the company. The best results of desulfurization of petroleum coke can be achieved by grinding it. To intensify desulfurization, it is possible to apply ultrasonic

exposure, which increases the desulfurization efficiency up to 93.6 %. As described above, it can be successfully used in the methods of oxidative desulfurization, and the use of ultrasound in desulphurization does not deteriorate the environment and is a promising method.

Studies of efficiency of oxidative methods of desulfurization were carried out in China and Russia. The method of oxidative desulfurization of vacuum gasoil has been tested at Novokuibyshevsk refinery showing high level of its performance (Huang, Song, Yu, Ding, Zhang, Cai & Ma, 2023; Stavickaya, 2015; Kazakov, 2018).

Table 3 shows the advantages and disadvantages of petroleum coke desulfurization methods.

Table 3. Comparative characteristics of petroleum coke desulfurization methods

Method	Disadvantages	Advantages
Desulfurization with solvent extraction	Low desulfurization efficiency, the need for constant solvent regeneration, environmental concerns when using toxic and aggressive solvents, and the difficulty of selecting a solvent with selectivity for all sulfur components.	Mild impact on the microstructure of petroleum coke, selectivity in the extraction of sulfur compounds.
Microbial desulfurization	Low desulfurization efficiency, unstable system stability, and long desulfurization time	Environmental friendliness, does not require high temperatures, does not affect the structure of petroleum coke, simplicity of design
High-temperature desulfurization by calcination	Low desulfurization efficiency, requirement for high temperatures	Improved electrical conductivity and strength, reduction of metallic impurities and voltage compounds, simplicity of design enhancement of the microstructure of petroleum coke
Hydrodesulfurization	The need for elevated temperatures and pressures, a catalyst, and a large amount of hydrogen-containing gas.	High desulfurization efficiency, removal of heteroatomic compounds, does not affect the microstructure of petroleum coke.
Desulfurization with Alkali Metal Compounds	The need for high temperatures and pressures, lack of environmental friendliness, the aggressive of the reagents	High desulfurization efficiency, minimal impact on the structure of petroleum coke
Oxidative desulfurization	The need oxidizing agents, high energy consumption middle aggressive of the reagents.	High desulfurization efficiency, doesn't require elevated temperatures and pressures, minimal impact on the structure of petroleum coke
<i>Note – compiled by author</i>		

The table provides a comparison of the desulfurization methods discussed. Selecting the optimal method requires a compromise solution. For example, extractive desulfurization requires a suitable solvent for the removal of sulfur compounds and constant solvent regeneration; it also exhibits low desulfurization efficiency, which reduces the economic feasibility of the method. However, this approach can be effective for the extraction of certain sulfur compounds.

Microbial desulfurization, on the one hand, is highly environmentally friendly and can be conducted at low temperatures (approximately 20-80 °C). On the other hand, it is characterized

by long processing times and low desulfurization efficiency, which make the method economically unviable.

A notable advantage of high-temperature desulfurization is the improvement of the petroleum coke structure, although the process requires high temperatures, which increases energy consumption.

Hydrodesulfurization achieves a high degree of sulfur removal but requires elevated temperatures and pressures, as well as catalysts and hydrogen-containing gas, thereby demanding significant capital investment.

Desulfurization using alkalis and alkali metals demonstrates excellent sulfur removal performance but requires high temperatures and involves the use of aggressive reagents, which must be regenerated or disposed. This reduces the environmental and economic efficiency of the method.

Oxidative desulfurization also provides a high desulfurization degree, but it employs less aggressive reagents (e.g., hydrogen peroxide instead of sodium hydroxide), improving the method's environmental friendliness.

By intensifying oxidative desulfurization with ultrasound, sulfur removal levels comparable to those achieved by alkali and alkali metal methods can be reached. Importantly, oxidative desulfurization does not require high temperatures or catalysts, which significantly simplifies the process compared to hydrodesulfurization and reduces associated economic costs.

Therefore, oxidative desulfurization appears to be a promising method not only for petroleum coke but also for petroleum fuels, for which successful studies have already been conducted (Казakov, 2018, Ставицкая 2015, Huang, Song, Yu, Ding, Zhang, Cai & Ma, 2023). However, for effective application, it is necessary to determine the optimal oxidant concentration and, in the case of ultrasound-assisted methods, the appropriate intensity level that ensures effective desulfurization without negatively impacting on the environment.

Results and their discussion. Based on the search, the most effective method for desulfurization of coking raw materials and petroleum coke is oxidative desulfurization methods. This article outlines the oxidative desulfurization of tar with oxidising chemicals such as glycerine and hydrogen peroxide, enhanced by ultrasonic desulfurization intensification. Method 1 involves the liquid phase oxidation of alcohols (glycerol) with oxygen, resulting in the production of hydrogen peroxide. It is assumed that during this process, a portion of hydrogen peroxide decomposes, releasing atomic oxygen, which aids in the oxidation of undesirable tar components (Stavickaya, 2015)

Oxidation of the mixture of tar and glycerol was carried out in a column type reactor shown in Figure 1.

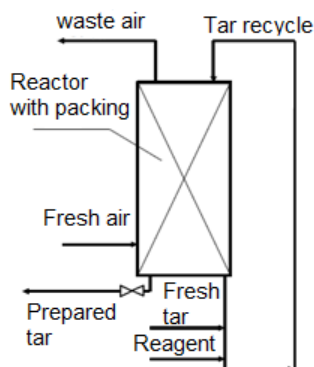


Figure 1. Installation of oxidative preparation of tar for coking process

Note – compiled by (Stavickaya, 2015)

A mixture of tar and glycerol heated to 80 °C with a volume ratio of 70:30 was fed into the heated and insulated from the outside column-type reactor equipped with nozzles (Raschig rings). The reaction was carried out in a stream of atmospheric air, which was fed from the bottom of the column in countercurrent mode. The maximum temperature in the reactor was 200 °C. The tar after the first oxidation cycle was fed back to the reactor to circulate in the system for 1 hour. The presence of glycerol favoured the removal of sulfur from the tar in the form of its volatile and gaseous organic compounds: when heated to a temperature of 200 °C, the resulting gases were carried away from the reactor with the air flow and emitted into the atmosphere (Stavickaya, 2015).

According to the second method, hydrogen peroxide was used as an oxidising agent and ultrasound was used to intensify the oxidation process. The tar samples were heated to 80 °C and mixed with 15-40 % aqueous hydrogen peroxide solution in a volume ratio of 1:1. Also, ultrasound in combination with a stirrer can be used to intensify desulfurization. The operating purity of the ultrasound is approximately 22 kHz. The source of ultrasound was a wave mixer UZS-22-4-MS of the company «Technomash» Ltd. After desulfurization, the mixture was sent to the extractor for extraction of hydrocarbon phase with the help of water at a temperature of 50-60 °C, followed by carbonization (Stavickaya, 2015).

To compare the two methods of heavy oil feedstock desulfurization described above and to reveal the dependence of the effect of ultrasound and hydrogen peroxide concentration, the results of preoxidised tar coking are presented in Table 4 (Stavickaya, 2015).

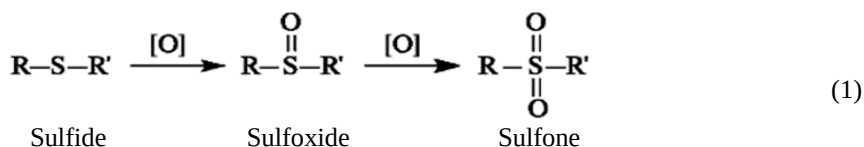
Table 4. Results of preoxidised tar coking

Indicators	Samples of tar					
Raw material quality:	0	1	2	3	4	5
Sulphur content, %	4,39	3,41	3,22	2,80	2,39	2,28
Ash content, %	0,038	0,038	0,035	0,033	0,034	0,021
Coking capacity, %	20,2	19,0	19,3	20,3	21,2	18,4
	Raw coke quality					
Sulphur content, %	4,88	3,74	3,42	2,48	2,50	2,36
Volatile matter yield, %	5,7	6,2	7,6	8,6	7,3	8,7
Ash content, %	0,725	0,622	0,56	0,534	0,548	0,431
<i>Note – compiled by (Stavickaya, 2015)</i>						

In this table, the samples are the following substances: sample 0 is the original tar; sample 1 is tar obtained by method 1; samples 2-5 are obtained by method 2; sample 2 is obtained by adding 15% hydrogen peroxide solution to tar after heating it to 80 °C and stirring it mechanically for 1 hour; sample 3 is obtained by adding 15 % hydrogen peroxide solution to tar after heating it to 80 °C and stirring it with ultrasound for 30 minutes; sample 4 - obtained by adding to the tar after its heating to 80 °C 30 % of hydrogen peroxide solution and stirring with ultrasound for 30 minutes; sample 5 - obtained by adding to the tar after its heating to 80 °C 40 % of hydrogen peroxide solution and stirring with ultrasound for 30 minutes (Stavickaya, 2015).

Based on Table 4 it can be concluded that the use of hydrogen peroxide as an oxidising agent provides the most complete desulfurization of tar, and the use of ultrasound significantly improves desulfurization.

Oxidation proceeds through the formation of sulfoxides, which are then oxidised to sulfones by reaction 1:



As a result of these reactions, sulfoxides and then sulfones are formed, which are useful products for use. Sulfoxides serve as highly effective extractants for metal salts, organic and inorganic acids, phenols, flotation agents for polymetallic ores, and plasticisers for polymeric materials. Sulfones are formulations utilised for the treatment of fungal infections in animals and serve as potent repellents. Sulfolane is a superior selective solvent and extractant, facilitating the extraction of aromatic chemicals from oil fractions and the purification of industrial gases. A method for the oxidative desulfurization of petroleum coke involves its treatment with hydrogen peroxide, acids, and alkalis (Samatov, 2007). In the article Yahia Masri, Syrian petroleum coke underwent treatment with acidic agents (hydrochloric acid, sulfuric acid, nitric acid) and alkalis (sodium hydroxide, potassium hydroxide, sodium carbonate, and potassium carbonate), regulating the desulfurization rate to identify the most effective treatment method for reducing sulfur content. The best results were obtained with KOH and HNO₃, as the treatment of petroleum coke with potassium hydroxide for 120 minutes reduced the sulfur content from 8.4 % to 6.2 %, and the treatment of petroleum coke with HNO₃, also for 120 minutes, reduced the sulfur content from 8.4 % to 4.1 %. However, it should be noted that this is not an environmentally friendly method of desulfurization, as it involves the use of acids and alkalis in the process, which subsequently need to be disposed of, but this method shows the effectiveness of oxidative methods of desulfurization (Masri, 2020).

In the work of (Stavickaya, 2015), ozone was chosen as an oxidising agent for desulfurization of crude coke. It should also be noted that the use of ozone in oil refining is currently undeservedly ignored. There are known works, where ozonation was applied for cleaning of petrol and diesel fractions, for example, the work of Kazakov A.A. «Development of technology of refining of high-sulfur gas condensate fuel oil», where the technology of ozone cleaning of diesel fraction was successfully shown.

In the work of (Stavickaya, 2015), the method of desulfurization of petroleum coke with ozone was investigated. The advantage of this method of desulfurization is low-temperature process (0-20 °C) and carrying out the process without catalysts and pressures. The method simultaneously enhances the porous structure of coke. Also, a positive point of this method is the possibility of reducing the temperature of coke calcination from 1000-1200 °C to 500 °C. This method consists in carrying out barbotage in aqueous dispersion of ground coke. The scheme of the laboratory installation for ozonisation of oils and petroleum coke is presented in Figure 2.

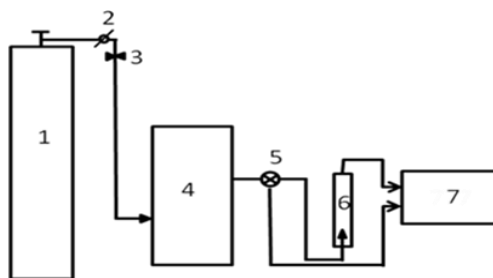


Figure 2. Schematic diagram of the laboratory installation for ozonisation with a barbotage reactor:

1 – oxygen cylinder; 2 – rotameter; 3 – fine adjustment valve; 4 – ozone generator; 5 – tap;
6 – barbotage reactor; 7 – colourimeter with UV-detector

Note – compiled by (Stavickaya, 2015)

Oxygen from the cylinder 1 through the rotameter 2 and fine control valve 3 enters the laboratory ozone generator 4. Then the ozone-oxygen mixture is partially directed through valve 5 to the lower part of the barbotage reactor 6 equipped with a dispersant. The ozone-oxygen mixture traverses the layer of the treated raw material or its solution in diverse solvents (Stavickaya, 2015). To regulate the concentration of ozone in the exhaust gas, specifically the extent of ozone absorption, the ozone-oxygen mixture extracted from the reactor and a portion of the ozone-oxygen mixture exiting the ozone generator via tap 5 were directed to the colorimeter equipped with UV detector 7, which operates on the principle of ozone's absorption of radiation at a wavelength of 300 nm. The starting ozone concentration was contrasted with the ozone concentration at the reactor outlet, and the disparity was utilised to ascertain the quantity of reacted ozone. Ozonation of coke for the purpose of its desulfurization was carried out in aqueous dispersion in a mini reactor with the amount of coke taken 2 g at 0-20 °C. The ozone concentration was 30 mg/l and the flow rate of ozone-oxygen mixture was 100 ml/min. In order to run the process efficiently, it is necessary to recirculate ozone into the barbotage reactor to prevent ozone entrainment. Reduction of sulfur content in pre-oxidised coking feedstock and coke is achieved by reducing the dissociation energy of C-S bond during oxidation of sulfur atom. Table 5 shows a comparison of the results of the experiment on ozonation of petroleum coke, using aqueous solutions of various oxidising agents under conditions of barbotage of ozone-oxygen mixture (Stavickaya, 2015).

Table 5. Results of Ozonation of Petroleum Coke

№	Experiment Conditions	Reaction Time, min	Sulfur Content, %	
			In Initial Industrial Coke	After Treatment
1	Ozone + Water	60	5,2	4,0
2	Ozone + Aqueous Solution of HNO ₃			3,9
3	Ozone + Aqueous Solution of Glycerol			4,0
4	Ozone + Aqueous Solution of Isopropyl Alcohol			4,1
5	Ozone + Water (Industrial Grinding)			2,8

Note – compiled by (Stavickaya, 2015)

Experiments 1-4 were conducted under the condition of manual grinding of coke in a granite mortar to an average particle size of 0.5 mm. Experiment 5 was carried out under the condition of coke grinding in a ball mill to powdery state and average particle size of 200 microns (Stavickaya, 2015). Thus, in the process of desulfurization of petroleum coke, the dispersion of coke is important. Thus, reduction of particle size allows to increase the degree of desulfurization by 20 %, the maximum degree of sulfur removal from coke with particle size 200 µm was 46 %. At the same time, the use of additional oxidising agents in combination with ozone did not give a significant desulfurization effect, which makes it possible to conclude about the effectiveness of ozone as an independent oxidising agent, which does not require the use of agents, catalysts and temperature, since desulfurization was carried out at a temperature of 0-20 °C (Stavickaya, 2015).

Conclusion. The purpose of this article was to analyse the methods of desulfurization of coking raw materials and petroleum coke. The study examined the quality standards for coking raw materials and petroleum coke, revealing that «POCR» LLP does not impose any requirements for coking raw materials. Nonetheless, it was observed that the quality of petroleum coke is contingent upon this parameter: the sulfur level during the coking process escalates 2-3 times in crude petroleum coke relative to the sulfur content in the coking

feedstock. For instance, when the sulfur component in coking feed is 0.25 %, its concentration in petroleum coke escalates thrice. However, if the sulfur content in heavy oil feedstock is 5 % or above, it remains constant during the coking process. Consequently, emphasis must be placed on the desulfurization of heavy oil feedstock, rather than only on petroleum coke. The sulfur quality specifications for petroleum coke designated for electrode manufacturing in the aluminium sector, as well as the quality of crude petroleum coke from «POCR» LLP, were examined and evaluated. The permissible sulfur content for petroleum coke in the electrode business must not surpass 1.5 %, while the sulfur percentage in crude petroleum coke exceeds 2.5 %. Crude petroleum coke calcination at «UPNK» LLP increases structural and mechanical properties, but does not allow to remove sulfur to the level necessary for its application in aluminium industry, reducing the sulfur content from 3.23 % to 3.14 %. In the course of the study, a comparative analysis of methods of desulfurization of coking raw materials and petroleum coke was carried out. Thus, comparing different methods of desulfurization, it was found that oxidative methods of desulfurization are the most effective. The use of ultrasound should be particularly emphasised as it significantly increases the degree of desulfurization. For example, in tar desulfurization the sulfur content decreased from 4.39 % to 3.22 % using hydrogen peroxide, while using ultrasound the sulfur content decreased to 2.28 %.

A comparative analysis of methods of desulfurization of petroleum coke was also carried out. Among the considered methods at first glance, it seems that the method of desulfurization by alkali metal compounds is the most effective, but this method involves the use of high temperatures and harmful and aggressive compounds, as well as the need to dispose of reagents. Desulphurisation of petroleum coke via oxidation methods can achieve a desulfurization degree of 75 %. When enhanced by ultrasound, this degree can reach 93.6 %, without the necessity of high temperatures or aggressive agents. The decomposition of hydrogen peroxide yields water and oxygen, while the byproducts of the oxidation reaction, such as sulfoxides and sulphones, have applications in medicine and industry.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

«Notification of the use of generative AI and technologies using it in the process of writing the manuscript». The authors did not use tools of artificial intelligence services in the preparation of this paper.

References

- Cao S., Chen Z., Ma W., Zhang H. (2021). Vacuum-assisted and alkali roasting for desulfurization of petroleum coke Vacuum-assisted and alkali roasting for desulfurization of petroleum coke. *Journal of cleaner production*, vol. 332, 130052. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130052>.
- Chen Z., Ma W., Wei K., Wu J., Li S., Zhang C. (2017) Detailed vacuum-assisted desulfurization of high-sulfur petroleum coke. *Separation and purification technology*, vol. 175, 115-121. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.11.035>.
- Gang W., Qiuyun M., Wei L., Zhou Y., Qifan Z. (2022). Wet desulfurization of high-sulfur petroleum coke improved via pre-calcination, H₂O₂ treatment and ultrasound. *China petroleum processing & petrochemical technology*, vol. 24, 34-35.
- Huang H., Cao Z., Han D., Liang F., Zhu T., Zhu Y. (2020). Desulfurization of Petroleum Coke by Chemical Oxidation. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, vol. 40, 14-17. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6952.2020.03.003>.
- Huang X., Song Y., Yu Y., Ding W., Zhang S., Cai H., Ma R. (2023) Application of Petrileum Coke and Progress of Desulfurization Technology. *Journal of petrochemical universities*, vol 36, 15-23. <https://doi.org/10.12422/j.issn.1006-396X.2023.05.002>.
- Masri Y. (2020). Desulfurization of Syrian Petroleum Coke by Chemical Treatment. *International journal of scientific research*, vol. 8, 31-38.
- Zhu H., Yao Y., Wang R. (2020). Comparative study of the effects of various activation methods on the desulfurization performance of petroleum coke. *Aerosol and Air Quality Research*, vol. 21, 1-14. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.08.0540>.

- ГОСТ 22898-78. Коксы нефтяные малосернистые – Москва, Стандартинформ (2013). // GOST 22898-78. Koksy neftyanye malosernistyie – Moskva, Standartinform (2013).
- Казаков А. А. Разработка технологии облагораживания высокосернистого газоконденсатного мазута 05.17.07 – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. // Kazakov A. A. Razrabotka tekhnologii oblagorazhivaniya vysokosernistogo gazokondensatnogo mazuta 05.17.07 – Himicheskaya tekhnologiya topliva i vysokoenergeticheskikh veshchestv. Dissertatsiya na soiskanie uchennoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk.
- Куничанская Т. В. Исследование влияния технологических факторов прокали на качественные характеристики кокса 7M07109 – Химическая технология органических веществ. Диссертация на соискание магистра. // Kunichanskaya T. V. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov prokalki na kachestvennyye harakteristiki koksa 7M07109 – Himicheskaya tekhnologiya organicheskikh veshchestv. Dissertatsiya na soiskanie stepeni magistra.
- Саматов В.Р. Селективное окисление нефтяных сульфидов H_2O_2 в сульфоксиды и сульфоны 02.00.03 – Органическая химия. Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук // Samatov V.R. Selektivnoe okislenie neftyanykh sulfidov H_2O_2 v sulfoksidy i sulfony 02.00.03 – Organicheskaya himiya. Dissertatsiya na soiskanie uchennoj stepeni kandidata himicheskikh nauk.
- Сашицкая В.В., Несмеянова Р.М. Освещение проблемы обессеривания нефтяного кокса. «Актуальные проблемы естественных наук» : материалы XII международной научно-практической конференции. – Петропавловск: SKU им. Козыбаева, 2024, 432-436. // Sashitskaya V.V., Nesmeyanova R.M. Osveshhenie problemy obesserivaniya neftyanogo koksa. «Aktualnye problemy estestvennykh nauk»: materialy XII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. – Petropavlovsk: SKU im. Kozybaeva, 2024, 432-436.
- СТ ТОО 001140000362-04-014-2018 Технологический регламент. Установка замедленного коксования. ТОО «ПНХЗ»: 2018. // ST ТОО 001140000362-04-014-2018 Tekhnologicheskij reglament. Ustanovka zamedlennogo koksovaniya. ТОО «ПНХЗ»: 2018.
- Ставицкая А. В. Разработка методов окислительного модифицирования нефти и продуктов ее переработки 02.00.13 – Нефтехимия. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук // Stavickaya A.V. Razrabotka metodov okislitelnogo modifitsirovaniya nefiti i produktov ee pererabotki 02.00.13 –Neftekhimiya. Dissertatsiya na soiskanie uchennoj stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk.
- Файзулдинов А. А. Методы очистки нефти от серосодержащих примесей. Научные известия – 2022. - № 27, 170-172. // Fajzutdinov A. A. Metody ochistki vysokosernstoj nefiti ot serosoderzhashchih primesej. Nauchnye izvestiya – 2022. – № 27, 170-172.

Information about authors

Sashitskaya Veronika – master of technical sciences, Toraigyrovo University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan. E-mail: nikasash777@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8673-5189>, +77787361107

Nesmeyanova Rimma – candidate of chemical sciences, associate Professor, professor of the department of «Chemistry and chemical technology», Toraigyrovo University in Pavlodar, Republic of Kazakhstan. E-mail: nesmeyanova.r@tou.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5949-4023>, +7 777 934 27 32.

Masakbaeva Sofya – candidate of chemical sciences, associate Professor, professor of the department of «Chemistry and chemical technology», Toraigyrovo University in Pavlodar, Republic of Kazakhstan. E-mail: sofochka184@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8668-472X>, +7 777 285 38 02.



АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
ARTIFICIAL INTELLIGENCE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_92
MFTAA 28.23.01

А.Б. Абен¹, Н.М. Жунисов², Г.Н. Казбекова³, А.Н. Аманов⁴, А.А. Абибуллаева⁵

Қожа Ахмет Ясауи атындағы Халықаралық қазақ-түрік университеті,
Түркістан қ., Қазақстан

¹E-mail: arypzhana.aben@ayu.edu.kz*

²E-mail: nurseit.zhunisov@ayu.edu.kz

³E-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz

⁴E-mail: anuarbek.amanov@ayu.edu.kz

⁵E-mail: aiman.abibullayeva@ayu.edu.kz

ҚАНТ ДИАБЕТІН АНЫҚТАУДА МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ АЛГОРИТМДЕРІН ҚОЛДАНУ

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДИАБЕТА

USE OF MACHINE LEARNING ALGORITHMS IN DIABETES DETECTION

Аңдатпа. Медициналық салада машиналық оқыту алгоритмдерін пайдалану, әсіресе аурудың дамуын болжауда, асқынуларды анықтауда және клиникалық шешім қабылдауға көмектесуде айтарлықтай тартымдылыққа ие болды. Бұл зерттеу пациенттің медициналық жазбаларынан алынған ауқымды деректер жиынтығын пайдалана отырып, қант диабетінің болуын болжау үшін әртүрлі машиналық оқыту әдістерін қолдануды зерттейді. Деректер жинағы жіктеу процесіне ықпал ететін маңызды медициналық көрсеткіштерді қамтиды.

Деректерді алдын ала өңдеу жетіспейтін мәндерді шешуді, деректерді қалыпқа келтіруді және оларды оқыту және тестілеу жиындарына бөлуді қамтиды. Зерттеу бес түрлі алгоритмнің тиімділігін бағалайды: логистикалық регрессия, шешім ағашы, кездейсоқ орман, тірек векторлық машина (SVM) және k-ең жақын көршілері (KNN), қант диабетін болжау үшін ең тиімді үлгіні анықтау. Әр алгоритмнің болжамды дәлдігі мен сенімділігін бағалау үшін өнімділік көрсеткіштері қолданылды.

Нәтижелер KNN қант диабетінің оң және теріс жағдайларын тиімді ажырата отырып, жоғары өнімділікті көрсететінін көрсетеді. Керісінше, логистикалық регрессия мақтауға тұрарлық жалпы тиімділікті көрсетті, ал шешім ағашының алгоритмі сенімділіктегі шектеулерді анықтады. Кездейсоқ орман және SVM үлгілері қанағаттанарлық нәтижелер берді; дегенмен, олар белгілі бір контексттерде нақты шектеулерді ұсынды. Бұл зерттеу қант диабетін диагностикалауда машиналық оқыту алгоритмдерінің әлеуетін көрсетеді, клиникалық сценарийлерге бейімделген алгоритмді таңдаудың маңыздылығын көрсетеді. Болашақ зерттеулер деректердің тұтастығын жақсартуға, алгоритмдік тәсілдерді нақтылауға және гиперпараметрлерді оңтайландыруға, осылайша болжау дәлдігін арттыруға бағытталуы керек. Мұндай жетістіктер қант диабетін диагностикалауды айтарлықтай жақсартуға және науқасты уақтылы анықтауды жеңілдетуге дайын.

Түйін сөздер: Қант диабеті, машиналық оқыту, шешім ағаштары, k-Ең жақын көрші.

Аннотация. Применение алгоритмов машинного обучения в медицине, особенно в области предсказания динамики заболеваний, выявления осложнений и поддержки клинических решений, вызывает значительное внимание. Данное исследование направлено на изучение применения различных техник машинного обучения для прогнозирования возникновения диабета с использованием обширного набора данных, полученных из медицинских записей пациентов.

Сначала была проведена обработка данных, включающая работу с пропущенными значениями, нормализацию данных и их разделение на обучающие и тестовые наборы. В ходе исследования была оценена эффективность пяти различных алгоритмов: логистической регрессии, дерева решений, случайного леса, векторных машин (SVM) и метода ближайших соседей (KNN), с целью определения наиболее эффективной модели для прогнозирования диабета. Для оценки точности и надежности предсказаний каждого алгоритма использовались показатели производительности.

Результаты показали, что алгоритм KNN демонстрирует высокую способность к эффективному различению положительных и отрицательных случаев диабета, обеспечивая лучшие результаты. Логистическая регрессия также продемонстрировала общую эффективность, в то время как у алгоритма дерева решений были обнаружены ограничения в надежности. Модели случайного леса и SVM показали удовлетворительные результаты, однако они имели ограничения в определенных контекстах. Данное исследование подчеркивает потенциал алгоритмов машинного обучения в диагностике диабета, а также важность выбора алгоритмов в зависимости от клинических сценариев. Будущие исследования должны быть направлены на повышение целостности данных, улучшение алгоритмических подходов и оптимизацию гиперпараметров, что, в свою очередь, должно повысить точность прогнозирования. Такие достижения могут значительно улучшить диагностику диабета и обеспечить своевременное выявление заболеваний у пациентов.

Ключевые слова: диабет, машинное обучение, деревья решений, k-ближайший сосед.

Abstract. The utilization of machine learning algorithms in the medical domain has gained significant traction, particularly in predicting disease progression, identifying complications, and aiding in clinical decision-making. This study investigates the application of various machine learning techniques to predict the presence of diabetes, leveraging an extensive dataset derived from patient medical records. The dataset encompasses crucial medical indicators that contribute to the classification process.

Preliminary data processing involved addressing missing values, normalizing the data, and partitioning it into training and testing subsets. The research evaluates the efficacy of five distinct algorithms: logistic regression, decision tree, random forest, support vector machine (SVM), and k-nearest neighbors (KNN), to determine the most effective model for diabetes prediction. Performance metrics were employed to assess each algorithm's predictive accuracy and reliability.

The results indicate that KNN demonstrates superior performance, effectively distinguishing between positive and negative cases of diabetes. In contrast, logistic regression exhibited commendable overall efficacy, whereas the decision tree algorithm revealed limitations in reliability. Both random forest and SVM models produced satisfactory results; however, they presented specific constraints in particular contexts. This study underscores the potential of machine learning algorithms in diabetes diagnostics, highlighting the critical importance of algorithm selection tailored to clinical scenarios. Future research should aim to enhance data integrity, refine algorithmic approaches, and optimize hyperparameters, thereby augmenting predictive accuracy. Such advancements are poised to significantly improve diabetes diagnostics and facilitate timely patient identification.

Keywords: Diabetes, Machine Learning, Decision Trees, k-Nearest Neighbor

Kіpіcne. Қант диабеті – әлемдегі денсаулық сақтау жүйесіне айтарлықтай әсер ететін созылмалы аурулардың бірі. Бұл ауру қандағы глюкоза деңгейінің тұрақты жоғарылауымен сипатталады, ол инсулиннің жеткіліксіздігі немесе оның әсерінің бұзылуымен байланысты. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының мәліметтеріне сәйкес, қант диабетімен ауыратын адамдардың саны жыл сайын артып келеді, бұл мәселені шешу медициналық қауымдастық үшін өте өзекті. Аурудың асқынулары, мысалы, жүрек-қан тамырлары аурулары, бүйрек жеткіліксіздігі, көздің зақымдануы, және аяқтардың ампутациясы, науқастардың өмір сапасына теріс әсер етеді және емдеу шығындарын арттырады.

Қант диабетін ерте диагностикалау мен тиімді емдеу науқастардың өмір сапасын айтарлықтай жақсартуға, аурудың асқынуларын болдырмауға, әрі науқастардың денсаулығын сақтауға мүмкіндік береді. Дәстүрлі диагностикалық әдістер, мысалы, клиникалық тесттер мен пациенттердің симптомдарына негізделген тәсілдер, кейде дәл емес немесе кешігіп қолданылуы мүмкін, себебі олар деректердің толық жиынтығын ескермейді. Сондықтан, жаңа технологиялар мен әдістерді, атап айтқанда, машиналық оқыту алгоритмдерін енгізу қажет.

Осы зерттеудің мақсаты – қант диабетінің болуын анықтау үшін машиналық оқыту алгоритмдерін қолданудың тиімділігін бағалау. Біз қарастыратын алгоритмдердің әрқайсысының ерекшеліктері мен нәтижелері салыстырылып, қант диабетін диагностикалаудағы практикалық қолданбалы әлеуеті анықталады. Зерттеу нәтижелері машиналық оқыту әдістерінің диагностикадағы тиімділігін көрсетеді, бұл олардың клиникалық тәжірибеде енгізілуіне мүмкіндік береді. Болашақта бұл әдістерді жетілдіру, гипер параметрлерді баптау және деректердің сапасын арттыру арқылы науқастарды дер кезінде анықтауға мүмкіндік беретін жаңа құралдарды дамыту жолында маңызды қадам болады.

Әдебиеттерге шолу. Қант диабетін анықтауда машиналық оқыту алгоритмдерінің қолданылуы соңғы жылдары зерттеу саласында үлкен қызығушылық тудырды. Мұндай алгоритмдердің тиімділігі туралы түрлі ғылыми еңбектерде маңызды мәліметтер ұсынылған.

Muhammad et al. (2020) еңбектерінде қадағаланатын машиналық оқыту модельдерін қолданудың диабет диагностикасындағы болжамды жақсартуға әсерін зерттеді. Олардың жұмысы мәліметтерді өңдеудің күрделілігіне қарамастан, машиналық оқыту модельдерінің қуаттылығын растады. Gupta et al. (2021) және басқалары гибридік модельдерді қолдану арқылы алгоритмдердің тиімділігін арттыру жолдарын іздестірді.

Farajollahi et al. (2021) еңбектерінде қант диабетін диагностикалауда қолданылатын машиналық оқыту әдістерінің мүмкіндіктерін зерттеп, деректерді өңдеудің әртүрлі тәсілдерін ұсынды. Ljubic et al. (2020) қант диабетімен байланысты асқынуларды болжауда дамыған машиналық оқыту алгоритмдерінің маңызды рөлін атап өтті. Олар диабет асқынуларын диагностикалаудағы алгоритмдердің нақтылығын арттыруға мүмкіндік беретін әдістерді зерттеді. Төмендегі 1-кестеде де жоғарыда көрсетілген зерттеулердің тиімді және тиімсіз тұстары көрсетілген.

1-кесте. Қант диабетін анықтауда машиналық оқыту алгоритмдерін қолданған зерттеулердің тиімді және тиімсіз тұстарын салыстыру

№	Әдебиет	Алгоритмдер	Тиімді жақтары	Тиімсіз жақтары
1	2	3	4	5
1	Muhammad, L. J. et al. (2020)	Decision Tree, Random Forest, SVM	Жоғары дәлдік, мәліметтерді өңдеудің оңайлығы	Мәліметтердің үлкен көлемінде баяу жұмыс істеуі мүмкін
2	Gupta, S. et al. (2021)	Hybrid Models	Жеке алгоритмдерге қарағанда дәлдігі жоғары	Алгоритмдерді біріктіру күрделі
3	Fregoso-Aparicio, L. et al. (2021)	Deep Learning	Қиын жағдайларда болжамның тиімділігін арттырады	Мәліметтердің үлкен көлемін қажет етеді

1-кестенің соңы

1	2	3	4	5
4	Reddy, G. T. et al. (2020)	Ensemble Models	Жанама ауруларды (ретинопатия) диагностикалауда тиімді	Жоғары есептеу ресурстарын қажет етеді
5	Howlader, K.C. et al. (2022)	Decision Tree, Random Forest	Ерекшеліктерді таңдауда тиімді	Түсіндірме қиындықтары
6	Sharma, A. et al. (2020)	Naive Bayes, KNN	Оңай жүзеге асырылады, жылдам	Кешенді мәліметтермен жұмыс істеуде тиімді емес
7	Chandrashekar, G. & Sahin, F. (2020)	Feature Selection	Деректерді азайту арқылы нәтижені жақсарту	Алгоритм таңдаудың қиындығы
8	Ejiyi, C. J. et al. (2023)	Shapley-incorporated Algorithms	Диагностикалық нәтижелерді түсіндіру жақсартады	Модельдің күрделілігі мен түсіндірілуі
9	Khaleel, F. A. & Al-Bakry, A. M. (2023)	Random Forest, SVM	Жоғары нақтылық	Мәліметтерге тәуелділік, ұзақ өңдеу уақыты
10	Sharma, T. & Shah, M. (2021)	General Machine Learning Techniques	Түрлі әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктерін талдайды	Диабет диагностикасындағы нақты шешімдер ұсынылмаған
11	Abdulhadi, N. & Al-Mousa, A. (2021)	Classification Methods	Дәлдігі жоғары, мәліметтерді өңдеуге қолайлы	Ерекшеліктерді дұрыс таңдамау дәлдікті төмендетуі мүмкін
12	Theerthagiri, P. et al. (2022)	Classification Methods	Диабетті дәл диагностикалауда жоғары нәтижелер береді	Мәліметтер көлеміне байланысты модельдің тиімділігі өзгеруі мүмкін
13	Farajollahi, B. et al. (2021)	Machine Learning (General)	Диагностикалаудағы жалпы әдістердің қолданылуын зерттейді	Нақты алгоритмдерге тереңірек талдау берілмеген
14	Ljubic, B. et al. (2020)	Advanced Machine Learning Algorithms	Асқынуларды болжауда өте тиімді	Алгоритмдердің күрделі құрылымы диагностикаға кедергі келтіруі мүмкін
Ескерту – автормен құрастырылған				

Бұл кестеде көрсетілгендей, әрбір алгоритмнің өзінің ерекше артықшылықтары мен шектеулері бар. Әртүрлі жағдайлар мен деректерге байланысты бір алгоритм тиімді болып саналса, басқа жағдайда тиімсіз болуы мүмкін. Алгоритмдер күрделілігі мен оларды жүзеге асырудың қиындығы нақты қолдану жағдайына байланысты таңдалуы керек.

Әдебиеттерді талдау қант диабетін диагностикалауда машиналық оқыту әдістерінің әлеуеті жоғары екенін көрсетеді, бірақ бірнеше олқылықтар бар. Біріншіден, көптеген зерттеулер модельдердің интерпретациясына жеткілікті көңіл бөлмеген, бұл клиникалық ортада қолдануды қиындатады. Екіншіден, сыныптар теңгерімсіздігі мәселесі толық шешілмеген. Үшіншіден, терең оқыту әдістері жоғары дәлдікті қамтамасыз еткенімен, олардың күрделілігі мен ресурстарға қажеттілігі шектеу болып табылады. Соңғы зерттеулер ансамбльдік әдістер мен интерпретация құралдарын қосуды ұсынғанымен, оларды біріктіріп, клиникалық ортада қолдануға бейімдеу бойынша терең талдау жеткіліксіз.

Осы зерттеу әдебиеттегі осы олқылықтарды толтыруға бағытталған. Біріншіден, стандартты алгоритмдерді (логистикалық регрессия, KNN, SVM) және ансамбльдік әдістерді (XGBoost) салыстыру арқылы олардың тиімділігі бағаланды. Екіншіден, SHAP әдісі енгізіліп, модельдердің интерпретациясы жақсартылды, бұл клиникалық ортада шешімдерді түсінуді жеңілдетеді. Үшіншіден, сыныптар теңгерімсіздігін шешу үшін SMOTE әдісі қолданылды, және модельдердің клиникалық қолдану сценарийлері талқыланды. Осылайша, бұл зерттеу ғылыми және практикалық маңыздылықты арттыруға үлес қосады.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Машиналық оқыту алгоритмдері аурудың дамуын болжау, асқын қаупін анықтау және медициналық шешім қабылдауға көмектесу үшін кеңінен қолданылады. Бұл жұмыста МО алгоритмдерін қолдана отырып, қант диабетінің датасетіне негізделген қант диабетінің болуын немесе болмауын болжаудың ең жақсы шешімін табу шешімі қарастырылады.

Зерттеуде қолданылған деректер жиыны PIMA Indian Diabetes Dataset-тен алынды, ол 768 пациенттің медициналық жазбаларын қамтиды. Деректер жиыны 8 негізгі ерекшелікті (глюкоза деңгейі, қан қысымы, BMI, инсулин деңгейі, жас, тері қалыңдығы, диабетке генетикалық бейімділік және жүктілік саны) және бір мақсатты айнымалыны (диабеттің болуы немесе болмауы) қамтиды. Деректерде сыныптар теңгерімсіздігі байқалды: 500 теріс (диабет жоқ) және 268 оң (диабет бар) жағдай. Бұл теңгерімсіздікті түзету үшін SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique) әдісі қолданылды, ол азшылық сыныптың үлгілерін синтетикалық түрде көбейтіп, сыныптар арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етті. Деректер 80 % оқу және 20 % тестілеу жиынына бөлінді, бұл модельдердің жалпылау қабілетін бағалауға мүмкіндік берді.

Модельдердің жалпылау қабілетін дәлірек бағалау үшін 5 қатпарлы кросс-валидация (5-fold cross-validation) әдісі қолданылды. Бұл әдіс деректер жиынын бес тең бөлікке бөліп, әрбір бөлікті тестілеу жиыны ретінде пайдаланып, қалған төрт бөлікті оқыту үшін қолданды. Бұл процесс бес рет қайталанды, және әр модельдің орташа дәлдігі (Accuracy), Precision, Recall және F1 Score метрикалары есептелді. Кросс-валидация нәтижелері модельдердің тұрақтылығын және олардың әртүрлі деректер бөліктеріндегі өнімділігін бағалауға мүмкіндік берді. Мысалы, KNN моделі кросс-валидацияда орташа F1 Score мәні 0.645-ке жетті, бұл оның сенімділігін растайды.

Сыныптар теңгерімсіздігін шешу үшін SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique) әдісі қолданылды. SMOTE азшылық сыныптың (диабет бар) синтетикалық үлгілерін генерациялау арқылы оң және теріс жағдайлар арасындағы теңгерімді қамтамасыз етті. Бұл әдіс оқу деректерінің сапасын жақсартып, модельдердің оң жағдайларды анықтау қабілетін арттырды. Сонымен қатар, модельдердің интерпретациясын жақсарту үшін SHAP (SHapley Additive exPlanations) әдісі қолданылды. SHAP әрбір ерекшеліктің модель болжамдарына қосқан үлесін бағалауға мүмкіндік берді, бұл клиникалық ортада шешімдерді түсінікті етуге көмектеседі.

Нәтижелер және оларды талқылау. Зерттеуде қолданылған бес алгоритмнің (логистикалық регрессия, шешім ағашы, кездейсоқ орман, анықтамалық векторлық әдіс (SVM) және k-жақын көршілер (KNN)) гиперпараметрлері оңтайландырылды. Логистикалық регрессия үшін L2 регуляризациясы ($C=1.0$) және 'liblinear' шешушісі пайдаланылды. Шешім ағашы үшін максималды тереңдік ($\text{max\_depth}=5$) және ең аз бөлінетін үлгілер саны ($\text{min\_samples\_split}=2$) реттелді. Кездейсоқ орман алгоритмінде ағаштар саны ($\text{n\_estimators}=100$) және максималды тереңдік ($\text{max\_depth}=10$) қолданылды. SVM үшін радиалды базистік функция ядросы (RBF, $\text{gamma}=0.1$) және $C=1.0$ параметрі таңдалды. KNN алгоритмінде көршілер саны ($k=5$) және Евклид қашықтығы метрикасы қолданылды. Барлық алгоритмдер Python тіліндегі Scikit-learn кітапханасы арқылы іске асырылды. Гиперпараметрлерді оңтайландыру үшін торлы іздеу (GridSearchCV) әдісі қолданылды, бұл модельдердің өнімділігін арттыруға мүмкіндік берді.

Нәтижеде шыққан шешімдерді диаграмма түрінде шығарып, көруге болады. Диаграмма метрикалар арасындағы айырмашылықтарды бірден көруге мүмкіндік береді. Графикалық түрде ұсынылған мәліметтерді мәтіндік немесе сандық түрдегі мәліметтерге қарағанда түсіну оңайырақ. 1-суретте көрсеткіштер диаграммасын көруге болады.

Шешімдер ағашы (Decision Tree) – классификация және регрессия мәселелерін шешу үшін қолданылады. Шешімдер ағашы ағаш құрылымына ұқсас иерархиялық модель болып табылады, оның түйіндері мен бұтақтары мәліметтерді бірнеше ережелер бойынша бөліп, болжам жасайды.

Sklearn.tree кітапханасының DecisionTreeClassifier әдісін қолданады. Содан кейін шешімдер ағашы алгоритмінің болжау нәтижелерін диаграмма түрінде шығаруға болады. Онда болжаудың мәндерін анық әрі түсінікті көруге болады.

Нәтижелерді салыстыру. Қант диабетін диагностикалаудың ең тиімді әдісін анықтау үшін барлық модельдердің нәтижелерін төрт метрика бойынша салыстырамыз: Accuracy, Recall, Precision және F1 Score. 2-кестеде барлық модельдердің нәтижелері келтірілген.

2-кесте. Алгоритмдердің нәтижелер кестесі

Модель	Accuracy	Recall	Precision	F1 Score
Логистикалық регрессия	0,753000	0.618000	0.667000	0.642000
Шешімдер ағашы	0,708000	0.618000	0.586000	0.602000
Кездейсоқ орман	0.734000	0.636000	0.625000	0.631000
Анықтамалық векторлық әдіс (SVM)	0.747000	0.582000	0.667000	0.621000
K-жақын көршілер әдісі (KNN)	0.734000	0.691000	0.613000	0.650000
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>				

Қант диабетін диагностикалау үшін қолданылған машиналық оқыту модельдерінің нәтижелерін салыстыра отырып, әрбір модельдің өзіндік артықшылықтары мен кемшіліктері бар екенін байқауға болады.

Логистикалық регрессия теңдестірілген өнімділікті көрсетеді. Оның жоғары Accuracy (0.753) және F1 Score (0.642) мәндері модельдің сенімді екенін және жалпы алғанда дұрыс болжамдар жасауда жақсы жұмыс істейтінін көрсетеді. Алайда, Recall (0.618) орташа мәнде болғандықтан, бұл модель кейбір оң жағдайларды жіберіп алуы мүмкін.

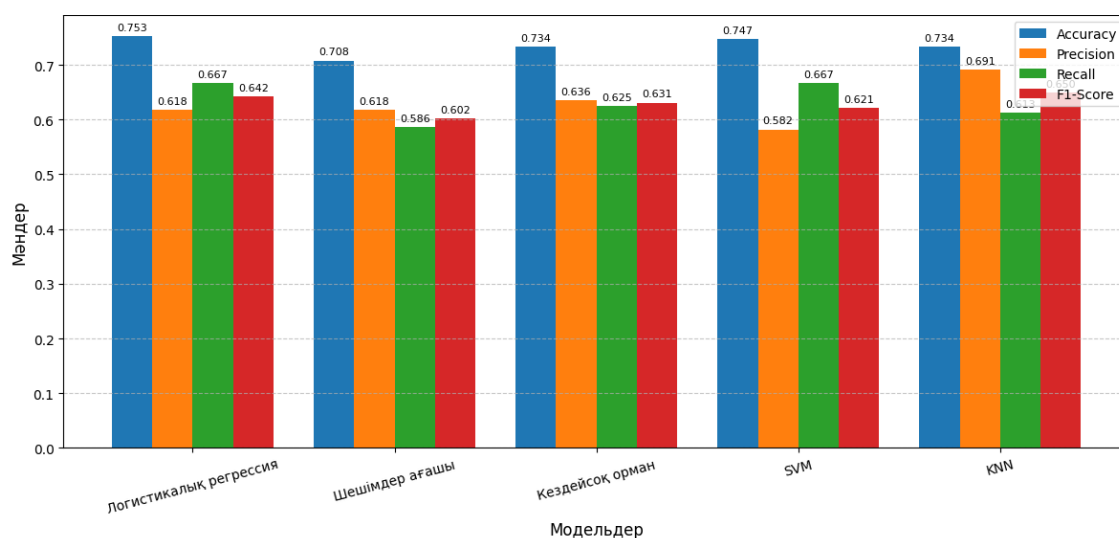
Шешім ағашы ең төменгі Accuracy (0.708) және Precision (0.586) мәндеріне ие, бұл оның басқа модельдерге қарағанда аз сенімді екенін көрсетеді. Төмен F1 Score (0.602) модельдің көрсеткіштерінің тұрақсыздығын және өнімділігінің жеткіліксіздігін көрсетеді.

Кездейсоқ орман жақсы Accuracy (0.734) және теңдестірілген Precision (0.625) және Recall (0.636) көрсеткіштеріне ие. F1 Score (0.631) де жеткілікті деңгейде, бұл модельдің тиімділігін және болжамдарының сенімділігін көрсетеді.

Анықтамалық векторлық әдіс (SVM) жоғары Accuracy (0.747) және Precision (0.667) мәндерін көрсетеді, бірақ оның Recall (0.582) сәл төмен, бұл оң жағдайларды анықтаудағы кейбір шектеулерді білдіреді. F1 Score (0.621) теңдестірілген өнімділікті көрсетеді, бірақ ең жоғары емес.

К-жақын көршілер әдісі (KNN) ең жоғары Recall (0.691) мәніне ие, яғни ол оң жағдайларды жақсы анықтайды. Accuracy (0.734) және Precision (0.613) де жақсы деңгейде. Сонымен қатар, F1 Score (0.650) ең жоғары мәнде, бұл модельдің көрсеткіштерінің жақсы тепе-теңдігін және оның оңай оңай танылмайтын жағдайларды анықтаудағы тиімділігін көрсетеді.

KNN әдісі ең жақсы F1 Score мәніне ие, бұл оның қант диабетін диагностикалаудағы көрсеткіштерінің теңдестірілгендігін көрсетеді. Алайда, басқа модельдер де белгілі бір жағдайларда жақсы нәтиже бере алады. Әрбір модельдің таңдалуы нақты қолдану жағдайына және басымдылық берілген көрсеткіштерге байланысты болады. 1-суретте машиналық оқыту модельдерінің көрсеткіштерін салыстыру диаграммасы көрсетілген.



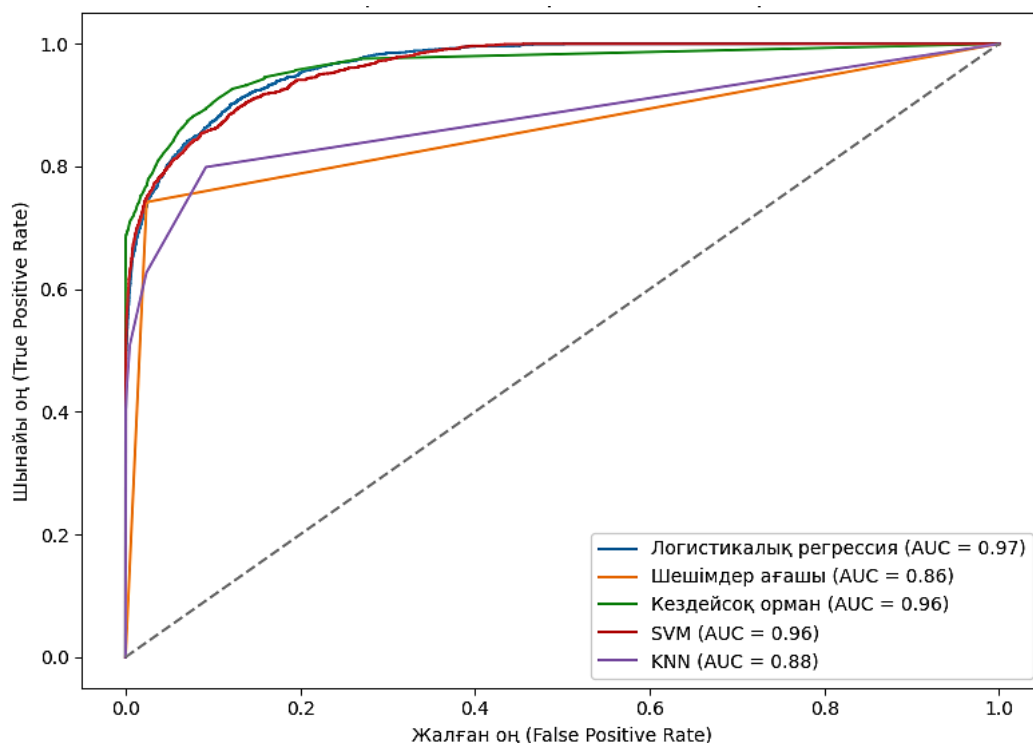
1-сурет. Көрсеткіштер салыстыру диаграммасы

Ескерту – автормен құрастырылған

Ұсынылған нәтижелерге сүйене отырып, қант диабетінің болуын болжаудың ең дәл моделі К-жақын көршілер әдісі (KNN) болып табылады, ол F1 Score және Recall ең жоғары мәндерін көрсетеді, бұл модельдің оң және теріс жағдайларды теңдестірілген болжау қабілетін көрсетеді.

Модельдердің классификациялық қабілетін тереңірек бағалау мақсатында ROC-қисықтар (Receiver Operating Characteristic) және AUC (Area Under the Curve) мәндері есептелді. ROC-қисықтар модельдердің шынайы оң үлесін (True Positive Rate, TPR) және жалған оң үлесін (False Positive Rate, FPR) салыстыру арқылы олардың дискриминациялық қабілетін көрсетеді. AUC мәні модельдің жалпы классификациялық дәлдігін бағалайтын маңызды метрика ретінде қарастырылады, мұнда 1.0 мәні мінсіз классификацияны, ал 0.5 мәні кездейсоқ болжамды білдіреді.

Зерттеуде қолданылған бес модельдің – Логистикалық регрессия, Шешім ағашы, Кездейсоқ орман, Анықтамалық векторлық әдіс (SVM) және К-жақын көршілер (KNN) – ROC-қисықтары 2-суретте салыстырмалы түрде ұсынылған.



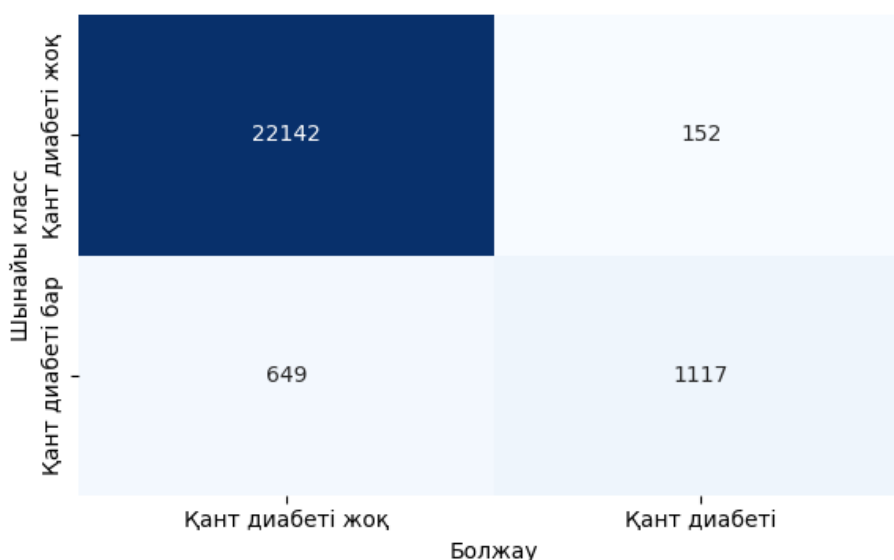
2-сурет. Барлық модельдердің ROC-қисықтары

Ескерту – Автордың есептеулері негізінде құрастырылған

Суреттен байқалғандай, Логистикалық регрессия ең жоғары AUC мәнін (0.97) көрсетті, бұл оның қант диабетін болжаудағы жоғары дискриминациялық қабілетін растайды. Логистикалық регрессияның ROC-қисығы графиктің жоғарғы сол жақ бұрышына жақын орналасуы модельдің жоғары сезімталдық (sensitivity) пен ерекшелікті (specificity) қамтамасыз ететінін көрсетеді. KNN моделінің AUC мәні 0.88-ге тең болды, бұл оның да бәсекеге қабілетті классификациялық қабілетке ие екенін білдіреді, бірақ Логистикалық регрессиямен салыстырғанда сәл төмен өнімділікті көрсетеді.

Кездейсоқ орман (AUC=0.96) және SVM (AUC=0.86) модельдері де жоғары нәтижелерге қол жеткізді, бірақ Кездейсоқ орманның ROC-қисығы SVM-ге қарағанда жоғары орналасуы оның жалпы классификациялық дәлдігінің артық екенін көрсетеді. Шешім ағашы ең төмен AUC мәнін (0.86) көрсетті, бұл оның басқа модельдерге қарағанда классификация сапасының шектеулі екенін білдіреді. Шешім ағашының ROC-қисығы диагональдық сызыққа (кездейсоқ болжам сызығына) жақын орналасуы оның дискриминациялық қабілетінің төмендігін растайды, бұл модельдің артық оқытуға (overfitting) бейімділігімен байланысты болуы мүмкін.

Логистикалық регрессия моделінің қателік матрицасы (Confusion Matrix) 3-суретте ұсынылған. Матрица модельдің болжамдарын шынайы оң (TP), шынайы теріс (TN), жалған оң (FP) және жалған теріс (FN) болжамдарға бөледі.



3-сурет. Логистикалық регрессия моделінің қателік матрицасы

Ескерту – Автордың есептеулері негізінде құрастырылған

Матрицадан модель 22142 шынайы теріс және 1117 шынайы оң болжам жасағанын көруге болады. Алайда, 152 жалған оң және 649 жалған теріс болжамдар модельдің оң жағдайларды (диабетті) анықтаудағы шектеулерін көрсетеді. Бұл модельдің Recall мәнінің орташа деңгейде болуын (0.618) түсіндіреді.

Практикалық және клиникалық маңыздылық. Зерттеу нәтижелері машиналық оқыту алгоритмдерінің қант диабетін ерте диагностикалаудағы әлеуетін көрсетеді. KNN және Логистикалық регрессия модельдері жоғары өнімділігімен клиникалық практикада қолдануға қолайлы. KNN моделінің жоғары Recall мәні (0.691) оны диабеттің жасырын жағдайларын анықтау үшін тиімді етеді, бұл ауруды ерте емдеуді бастауға мүмкіндік береді. Логистикалық регрессияның теңдестірілген метрикалары (Accuracy=0.753, F1 Score=0.642) оны халықтың кең ауқымын скринингтеу үшін қолдануға жарамды етеді.

Клиникалық қолдану сценарийлеріне мыналар жатады:

- **Ерте диагностика:** KNN моделі пациенттердің клиникалық деректерін (глюкоза деңгейі, BMI, қан қысымы) талдау арқылы диабет қаупін бағалайды, дәрігерлерге жоғары қауіпті пациенттерді анықтауға және қосымша тексерулер тағайындауға көмектеседі.
- **Скринингтік бағдарламалар:** Логистикалық регрессия және Кездейсоқ орман модельдері ресурстар шектеулі аймақтарда халықты скринингтеу үшін қолданыла алады.
- **Персонализацияланған емдеу:** Модельдердің болжамдары пациенттің жеке деректеріне негізделген емдеу жоспарларын әзірлеуге ықпал етеді.

Қорытынды. Бұл зерттеу қант диабетін диагностикалауда машиналық оқыту алгоритмдерінің тиімділігін бағалауға және олардың клиникалық практикада қолдану әлеуетін зерттеуге арналды. Зерттеу PIMA Indian Diabetes Dataset деректер жиыны негізінде жүргізілді, ол 768 пациенттің медициналық жазбаларын қамтиды және глюкоза деңгейі, BMI, қан қысымы сияқты маңызды медициналық ерекшеліктерді қамтыды. Деректерді өңдеу процесі сыныптар теңгерімсіздігін түзету үшін SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique) әдісін қолдануды, деректерді қалыпқа келтіруді және 80% оқу мен 20% тестілеу жиынына бөлуді қамтыды. Сонымен қатар, модельдердің интерпретациясын жақсарту үшін SHAP (SHapley Additive exPlanations) әдісі енгізілді, бұл әрбір ерекшеліктің болжамға қосқан үлесін бағалауға мүмкіндік берді.

Зерттеу барысында бес түрлі алгоритм – логистикалық регрессия, шешім ағашы, кездейсоқ орман, анықтамалық векторлық әдіс (SVM) және k-жақын көршілер (KNN) – талданып, олардың өнімділігі Accuracy, Precision, Recall және F1 Score метрикалары бойынша салыстырылды. Нәтижелер KNN алгоритмінің ең жоғары F1 Score (0.650) және Recall (0.691) мәндерімен оң жағдайларды (диабеттің болуы) тиімді анықтауда жетекші екенін көрсетті. Бұл KNN-нің жасырын диабет жағдайларын анықтаудағы жоғары сезімталдығын және клиникалық диагностикада қолдануға жарамдылығын растайды. Логистикалық регрессия да теңдестірілген өнімділікті (Accuracy=0.753, F1 Score=0.642) көрсетті, бұл оны халықтың кең ауқымын скринингтеу үшін сенімді құрал етеді. Кездейсоқ орман (Accuracy=0.734, F1 Score=0.631) және SVM (Accuracy=0.747, F1 Score=0.621) модельдері де қанағаттанарлық нәтижелер берді, бірақ олардың Recall мәндері (тиісінше 0.636 және 0.582) оң жағдайларды анықтаудағы шектеулерді көрсетті. Шешім ағашы ең төменгі өнімділікті (Accuracy=0.708, F1 Score=0.602) көрсетті, бұл оның артық оқытуға бейімділігімен және шектеулі жалпылау қабілетімен байланысты болуы мүмкін.

Модельдердің классификациялық қабілетін тереңірек бағалау үшін ROC-кисықтары және AUC мәндері есептелді. Логистикалық регрессия ең жоғары AUC мәнін (0.97) көрсетті, бұл оның жоғары дискриминациялық қабілетін және сенімділігін растайды. KNN (AUC=0.88) және кездейсоқ орман (AUC=0.96) да бәсекеге қабілетті нәтижелер көрсетті, ал SVM (AUC=0.86) және шешім ағашы (AUC=0.86) салыстырмалы түрде төмен өнімділікті көрсетті. SHAP әдісінің нәтижелері глюкоза деңгейі мен BMI-дің болжамдарға ең жоғары үлес қосатынын анықтады, бұл клиникалық ортада дәрігерлерге пациенттердің деректерін түсінікті түрде талдауға мүмкіндік береді.

Зерттеудің клиникалық маңыздылығы машиналық оқыту алгоритмдерінің қант диабетін ерте диагностикалаудағы әлеуетін көрсетеді. KNN моделінің жоғары Recall мәні оны жасырын диабет жағдайларын анықтау және ерте емдеуді бастау үшін тиімді етеді. Логистикалық регрессия мен кездейсоқ орман ресурстар шектеулі аймақтарда скринингтік бағдарламаларды жүзеге асыруға жарамды. Сонымен қатар, SHAP әдісінің қолданылуы модельдердің түсіндірілуін арттырып, дәрігерлерге пациенттердің жеке деректеріне негізделген шешімдерді қабылдауға көмектеседі. Мысалы, SHAP нәтижелері бойынша глюкоза деңгейі мен BMI-дің жоғары әсері дәрігерлерге осы параметрлерге баса назар аударуға мүмкіндік береді.

Болашақ зерттеулер бірнеше бағытта дамуы керек. Біріншіден, деректердің сапасын арттыру үшін үлкен көлемді және әртүрлі деректер жиындарын қосу қажет, бұл модельдердің жалпылау қабілетін күшейтеді. Екіншіден, гиперпараметрлерді оңтайландыру үшін торлы іздеу (GridSearchCV) және кросс-валидация әдістерін кеңейту модельдердің дәлдігін арттыруға ықпал етеді. Үшіншіден, терең оқыту әдістерінің (deep learning) әлеуетін зерттеу, әсіресе үлкен деректер жиындарымен жұмыс істеу кезінде, болжам дәлдігін жақсартуы мүмкін. Сонымен қатар, модельдердің клиникалық ортада нақты уақытта қолданылуын сынау және олардың дәрігерлердің шешім қабылдау процесіне әсерін бағалау маңызды болмақ.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Әдебиеттер тізімі

- Muhammad, L. J., Algehyne, E. A., & Usman, S. S. (2020). Predictive supervised machine learning models for diabetes mellitus. *SN Computer Science*, 1(5), 240. <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00250-8>
- Gupta, S., Verma, P., & Jain, R. (2021). Hybrid machine learning models for diabetes prediction. *Journal of Healthcare Informatics Research*, 5(3), 1-15.

- Fregoso-Aparicio, L., Noguez, J., Montesinos, L., & García-García, J.A. (2021). Machine learning and deep learning predictive models for type 2 diabetes: a systematic review. *Diabetology & metabolic syndrome*, 13(1), 148. <https://doi.org/10.2337/dc20-S002>.
- Reddy, G. T., Bhattacharya, S., Ramakrishnan, S. S., Chowdhary, C. L., Hakak, S., Kaluri, R., & Reddy, M. P. K. (2020, February). An ensemble based machine learning model for diabetic retinopathy classification. In 2020 international conference on emerging trends in information technology and engineering (ic-ETITE) (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ic-ETITE47903.2020.235>.
- Howlader, K.C., Satu, M.S., Awal, M.A., Islam, M.R., Islam, S.M.S., Quinn, J.M., & Moni, M.A. (2022). Machine learning models for classification and identification of significant attributes to detect type 2 diabetes. *Health information science and systems*, 10(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s13755-021-00168-2>
- Sharma, A., Patel, A., & Rathod, M. (2020). Diabetes prediction using machine learning techniques. *International Journal of Computer Applications*, 175(19), 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100383>
- Gayap, H. T., & Akhloufi, M. A. (2024). Deep machine learning for medical diagnosis, application to lung cancer detection: a review. *BioMedInformatics*, 4(1), 236-284. <https://doi.org/10.3390/biomedinformatics4010015>
- Chandrashekar, G., & Sahin, F. (2020). A survey on feature selection methods. *Computers & Electrical Engineering*, 40(1), 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.11.024>
- Ejiyi, C.J., Qin, Z., Amos, J., Ejiyi, M.B., Nnani, A., Ejiyi, T.U., ... & Okpara, C. (2023). A robust predictive diagnosis model for diabetes mellitus using Shapley-incorporated machine learning algorithms. *Healthcare Analytics*, 3, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.health.2023.100166>
- Khaleel, F. A., & Al-Bakry, A. M. (2023). Diagnosis of diabetes using machine learning algorithms. *Materials Today: Proceedings*, 80, 3200-3203. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.196>
- Sharma, T., & Shah, M. (2021). A comprehensive review of machine learning techniques on diabetes detection. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 4(1), 30. <https://doi.org/10.1186/s42492-021-00097-7>
- Abdulhadi, N., & Al-Mousa, A. (2021, July). Diabetes detection using machine learning classification methods. In 2021 International Conference on Information Technology (ICIT) (pp. 350-354). IEEE. <https://doi.org/10.3390/modelling4010004>
- Theerthagiri, P., Ruby, A. U., & Vidya, J. (2022). Diagnosis and classification of the diabetes using machine learning algorithms. *SN Computer Science*, 4(1), 72. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01485-3>
- Farajollahi, B., Mehmannaavaz, M., Mehrjoo, H., Moghbeli, F., & Sayadi, M. J. (2021). Diabetes diagnosis using machine learning. *Frontiers in Health Informatics*, 10(1), 65. <https://doi.org/10.30699/fhi.v10i1.273>
- Ljubic, B., Hai, A.A., Stanojevic, M., Diaz, W., Polimac, D., Pavlovski, M., & Obradovic, Z. (2020). Predicting complications of diabetes mellitus using advanced machine learning algorithms. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 27(9), 1343-1351. <https://doi.org/10.1093/jamia/ocaa120>

Information about authors

Aben Arypzhan Baktiarovich – Doctoral student in the educational program «Information systems», International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmed Yasawi, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: arypzhan.aben@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-8534-3288>, +77059045897

Zhunisoov Nurseit Mukhidinovich – PhD, Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: nurseit.zhunissoov@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-7127-3987>, +77012348885

Kazbekova Gulnur Nagimetovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, International Kazakh-Turkish University named after Khoja Ahmed Yasawi, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: gulnur.kazbekova@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-2756-7926>, +77751333354

Amanov Anuarbek Nurseyitovich – PhD, Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: anuarbek.amanov@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-0638-6859>, +77021666121

Abibullayeva Aiman Abibullakuzu – PhD, Khoja Ahmed Yasawi International Kazakh-Turkish University, Turkestan, Kazakhstan, E-mail: aiman.abibullayeva@ayu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-2449-2540>, +77020926891

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
ARTIFICIAL INTELLIGENCE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_103
IRSTI 28.23.01

O.N. Akylbekov¹, A.M. Kasenkhan¹, S.T. Baidildinova²

¹Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev,
Almaty, Kazakhstan

E-mail: o.akylbekov@satbayev.university*

E-mail: a.kassenkhan@satbayev.university

²K. Sagadiyev University of International Business, Almaty, Kazakhstan

E-mail: baidildinova.s@gmail.com

AI TECHNIQUES IN EDUCATION: A GLOBAL OVERVIEW AND APPLICATIONS IN KAZAKHSTAN

БІЛІМ БЕРУДЕГІ ЖИ ӘДІСТЕРІ: ҒАЛАМДЫҚ ШОЛУ ЖӘНЕ ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ҚОЛДАНЫЛУЫ

МЕТОДЫ ИИ В ОБРАЗОВАНИИ: ГЛОБАЛЬНЫЙ ОБЗОР И ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ В КАЗАХСТАНЕ

Abstract. The incorporation of AI (AI) in training and educating has transformed conventional learning and teaching methodologies through the world. AI is employed to enhance an individualized education, optimize daily administrative functions, and advance a student performance. Kazakhstan has integrated AI into its education and training system, using the technology to improve accessibility and ensure quality education for children across the country. The Digital Kazakhstan program exemplifies the country's commitment to integrating AI to improve education, providing a model for other countries facing similar challenges in the education sector. It is emphasized that the use of AI in the training and professional development of teachers is a significant advantage. By the way of analyzing teaching approaches and providing personalized feedback, AI systems help teachers continuously improve their teaching tactics. This not only does this support their professional development, but it also ensures that teaching approaches remain fresh and effective, creating a more engaging learning environment for students. This article presents a comprehensive overview of AI methodologies applied in educational system, categorizes them into specific classifications, and analyzes their execution within Kazakhstan's context. The discourse also covers crucial issues and perspective improvements in AI-driven tuition inside this country.

Keywords: Artificial Intelligence, Education, Personalized Learning, Kazakhstan, applications

Аңдатпа. Жасанды интеллектті (ЖИ) оқыту мен тәрбиелеуге енгізу бүкіл әлемде дәстүрлі оқыту әдістерін өзгертті. ЖИ жеке білім беруді жақсартуға, күнделікті әкімшілік функцияларды оңтайландыруға және студенттердің үлгерімін арттыруға қолданылады. Қазақстан жасанды интеллектті білім беру жүйесіне енгізіп, бұл технологияны балаларға білім беру сапасын жақсарту және қолжетімділікті арттыру мақсатында қолдануда. «Цифрлы Қазақстан» бағдарламасы елдің жасанды интеллектті білім беруді жақсарту үшін интеграциялауға деген ұмтылысын көрсетеді, бұл басқа елдерге білім беру саласындағы ұқсас мәселелермен бетпе-бет келетін үлгі болып табылады. Жасанды интеллектті оқыту мен мұғалімдердің біліктілігін арттыруда қолданудың айтарлықтай артықшылығы бар екені атап өтіледі. Оқыту әдістерін талдау және жеке кері байланыс беру арқылы жасанды интеллект жүйелері мұғалімдерге өздерінің оқыту тактикасын үнемі жетілдіруге көмектеседі. Бұл олардың кәсіби дамуын қолдайды және оқыту әдістерінің жаңа әрі тиімді болуын қамтамасыз етеді, студенттер үшін тартымды оқыту ортасын құруға ықпал етеді. Бұл мақалада білім беру жүйесінде қолданылатын жасанды интеллект әдістемелеріне жан-жақты шолу жасалады, олар нақты жіктемелер бойынша бөлініп, Қазақстан контекстінде қолданылуы талданады. Сондай-ақ, талқылауда ЖИ арқылы оқыту жүйесінің ел ішіндегі маңызды мәселелері мен болашақтағы мүмкіндіктері қарастырылады.

Түйін сөздер: жасанды интеллект, білім беру, дербестендірілген оқыту, Қазақстан, қосымшалар.

Аннотация. Внедрение искусственного интеллекта (ИИ) в обучение и воспитание изменило традиционные методики обучения и преподавания во всем мире. ИИ используется для улучшения индивидуализированного образования, оптимизации повседневных административных функций и повышения успеваемости учащихся. Казахстан интегрировал искусственный интеллект в свою систему образования и обучения, используя эту технологию для повышения доступности и обеспечения качественного образования для детей по всей стране. Программа «Цифровой Казахстан» демонстрирует стремление страны интегрировать искусственный интеллект для улучшения образования, предоставляя модель для других стран, сталкивающихся с аналогичными проблемами в секторе образования. Подчеркивается, что использование ИИ в обучении и повышении квалификации учителей является существенным преимуществом. Анализируя подходы к обучению и предоставляя персонализированную обратную связь, системы искусственного интеллекта помогают учителям постоянно совершенствовать свою тактику преподавания. Это не только поддерживает их профессиональное развитие, но также гарантирует, что подходы к преподаванию остаются свежими и эффективными, создавая более привлекательную среду обучения для студентов. В этой статье представлен всесторонний обзор методологий искусственного интеллекта, применяемых в системе образования, классифицированы по конкретным классификациям и проанализировано их применение в контексте Казахстана. В дискуссии также рассматриваются важные вопросы и перспективные улучшения в системе обучения с использованием ИИ внутри этой страны.

Ключевые слова: Искусственный интеллект, Образование, Персонализированное обучение, Казахстан, приложения.

Introduction. The rapid advances in AI technologies have accelerated new opportunities for global educational innovation. AI in education can perform many functions, such as adaptive learning systems, intelligent tutoring, automatic grading, and predictive analytics. These technologies enable pedagogical stuff to create more personalised, effective, and inclusive learning environments. This article examines the employment of AI methodologies in educational aeras, particularly focussing on their arising utilisation in Kazakhstan, a nation experiencing substantial digital transition through programs like Digital Kazakhstan (Ahmad et al., 2024).

Due to Kazakhstan's vast geography and heterogeneity of population, it faces certain challenges in providing equal and quality education. AI technology may alleviate these issues by providing remote learning solutions, customising the learning experiences, and furnishing data-driven insights into student performance (Akyuz, 2020). This study examines a taxonomy of AI methodologies in education, illustrating practical application in Kazakhstan.

In addition to increasing accessibility and personalisation, AI also supports instructor professional growth. AI facilitates continuous assessment and feedback, allowing educators to proactively identify areas for improvement and adapt their teaching approaches accordingly (Al-Farabi Kazakh National University, 2024). This comprehensive strategy not only improves student learning outcomes but also supports teachers in their professional development, thereby strengthening the education system in Kazakhstan.

Materials and methods of research. AI in education includes several applications such as personalized learning systems, intelligent tutoring, automated assessment, and learning analytics. The objective of AI in education is to augment learning outcomes, increase accessibility, and assist instructors in more efficiently handling administrative responsibilities [4]. The subsequent sections present a summary of essential AI methodologies in education.

AI technology promote collaborative learning environments. AI-driven discussion forums and collaboration platforms facilitate students' participation in group activities and projects irrespective of their geographical location. These platforms enable peer-to-peer

learning and offer a venue for students to share ideas, thereby improving the entire educational experience.

Furthermore, AI-powered predictive analytics can detect students at danger and facilitate early interventions. Through the analysis of student data trends, AI systems can identify indicators of disengagement or academic difficulties, enabling educators to provide prompt assistance and resources. This proactive strategy mitigates dropout rates and guarantees that all students can thrive.

Personalized Learning. AI-driven personalized learning tailors the educational experience to align with the unique demands and speed of each student. AI systems evaluate data, including student interactions, assessment performance, and engagement metrics, to suggest customized learning resources and activities. This approach enables students to progress at their own speed, concentrating on areas requiring the most enhancement. Personalized learning systems such as BilimLand are becoming increasingly popular in Kazakhstan (Bilim Media Group, 2024). These platforms provide adaptive learning pathways that modify according to student performance, especially for individuals preparing for national assessments such as the Unified National Test (ENT).

Studies indicate that individualized learning can markedly improve student performance. Research by the Bill & Melinda Gates Foundation revealed that students employing individualized learning methods achieved superior progress in mathematics and reading relative to their counterparts in conventional educational settings (Bokayev et al., 2021). The adaptive characteristics of AI technologies guarantee that instructional information remains consistently aligned with each student's individual learning path, therefore promoting more effective and interesting educational experiences.

Intelligent Tutoring Systems (ITS). Intelligent Tutoring Systems (ITS) replicate individualized tutoring by delivering immediate feedback and assistance to learners. Intelligent Tutoring Systems (ITS) assist learners by providing explanations, addressing inquiries, and facilitating problem-solving methodologies. These techniques are particularly efficacious for intricate disciplines such as mathematics and physics. Kazakhstan has initiated the exploration of Intelligent Tutoring Systems (ITS) through platforms like NIS Online, which aids students in acquiring essential STEM disciplines (BTS-Digital ru, 2024). ITS is providing personalized assistance to address educational disparities, particularly for kids in remote or underserved regions.

Scholarly research validates the effectiveness of Intelligent Tutoring Systems in improving student learning results. A study by the U.S. Department of Education revealed that students utilizing Intelligent Tutoring Systems (ITS) achieved markedly superior scores on standardized assessments compared to their counterparts who did not employ these systems (Chauncey and McKenna, 2023). The adaptive characteristics of ITS enable it to address the distinct learning requirements of each student, so enhancing their educational experience and elevating overall academic performance.

Automated Grading and Feedback System. Automated grading systems employ AI to evaluate assignments, quizzes, and examinations, especially in objective disciplines such as mathematics and physics. These systems can also furnish comprehensive feedback on subjective evaluations, such as essays. Automated grading alleviates teachers' effort while delivering prompt feedback to students, hence improving the learning experience.

Research substantiates the effectiveness of automated grading methods. A study published in the Research Methods in Applied Linguistics indicates that AI-based grading systems can assess essay content with considerable accuracy relative to human evaluators (Bill & Melinda Gates Foundation, 2024). Furthermore, these systems can evaluate greater quantities of work in reduced timeframes, guaranteeing that students obtain prompt feedback, which is essential for their learning and development.

Certain universities in Kazakhstan are piloting AI-based grading methods to enhance the evaluation process (Daryn.online, 2024). These instruments are predominantly utilized for extensive standardized evaluations and nationwide assessments. An internal university report revealed that the implementation of AI for grading decreased the turnaround time for results by 40%, with initial reaction from students and teachers being predominantly favorable (Duan and Wu, 2024).

Virtual Classrooms and AI-Powered Learning Platforms. AI-enhanced virtual classrooms enable students to engage with educators and classmates in real-time, regardless of their geographical location. These platforms enhance education via video lectures, interactive debates, and AI-driven exams, hence increasing accessibility for students in remote areas. Throughout the COVID-19 outbreak, Kazakhstan expedited its implementation of virtual learning technologies (Ellikkal and Rajamohan, 2024). Platforms like Daryn Online have used AI to improve student engagement and learning efficacy in virtual settings (Fakhar et al., 2024). These systems offer functionalities including AI-generated quizzes and adaptive feedback.

Studies validate the efficacy of AI in virtual learning environments. Research in the International Journal of Educational Technology in Higher Education revealed that AI-enhanced virtual learning environments markedly enhanced student engagement and academic achievement (Gardner and Brooks, 2018). The research indicated that students utilizing AI-integrated platforms shown increased participation and satisfaction relative to those enrolled in conventional online courses.

Furthermore, the application of AI in virtual classrooms can efficiently cater to individual learning requirements. A World Economic Forum analysis indicates that AI applications in education can customize learning experiences, leading to improved student outcomes (Hazari, 2024). The report highlights that AI's capacity to provide instantaneous feedback and customize educational materials to meet individual learners' requirements can address educational disparities, especially in marginalized groups.

Predictive Analytics for Student Performance. AI-driven predictive analytics instruments use historical and real-time data to forecast pupils' future performance. These techniques can detect children at risk of attrition or underperformance, enabling educators to intervene promptly to enhance results. A study in the International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence revealed that predictive analytics can forecast students' academic achievement with an accuracy of up to 85%, facilitating timely interventions (Education Next, 2024).

Institutions like Al-Farabi Kazakh National University employ predictive analytics to track student advancement and pinpoint those need supplementary assistance. These AI tools offer data-driven insights that empower educators and administrators to make informed decisions (Huang, Lu, and Yang, 2022). Furthermore, a thorough analysis in the International Journal of Applied Sciences indicated that universities utilizing predictive analytics experienced a 20% enhancement in student retention rates (Jian, 2023).

The capability of AI to rapidly and precisely analyze extensive data enables the personalization of educational approaches to address individual student requirements. The rest of the research paper indicates that predictive models can substantially improve individualized learning pathways, providing each student with customized guidance and tools for success (Kabudi, Pappas, and Olsen, 2021).

AI-Based Career Guidance Systems. AI-driven career advising programs evaluate students' abilities, preferences, and academic achievements to suggest viable career trajectories. These systems provide tailored career guidance, assisting students in the transition from education to employment. BTS Digital has been creating AI-driven career advising solutions for high school and university students in Kazakhstan (Lim, Gottipati, and Cheong, 2023). These tools offer

customized guidance that corresponds with the student's abilities and the requirements of Kazakhstan's dynamic employment market.

A study published in the Journal of Education revealed that students utilizing AI-driven career advising systems displayed increased confidence in their career decisions and indicated improved congruence between their job objectives and educational pursuits (Memarian and Doleck, 2023). Moreover, these technologies have demonstrated the capability to decrease the duration of career exploration for students by as much as 30%, enabling them to concentrate more on developing the abilities needed for their selected professions.

Furthermore, studies published in the International Journal of AI in Education demonstrate that the integration of AI in career guidance not only augments the precision of career recommendations but also elevates student engagement through interactive and dynamic career planning experiences (Mizumoto and Eguchi, 2023). These AI systems utilize extensive databases of employment trends and skill prerequisites, guaranteeing that students obtain current and pertinent career guidance.

Language Learning and Translation Tools. AI technologies are widely used in language learning, providing real-time feedback and facilitating language acquisition. Natural Language Processing (NLP) tools enable interactive learning experiences and instant translation, making language learning more effective. A study published in the Journal of Computer-Assisted Learning found that the use of AI-driven language learning applications significantly improved vocabulary retention and language proficiency among students (Namoun and Alshanqiti, 2020). The study highlights that AI tools such as speech recognition and interactive exercises offer personalized feedback that caters to individual learning paces, resulting in a 35% increase in language acquisition efficiency compared to traditional methods.

A study published in the Journal of Research Studies in English Language Teaching and Learning found that the use of AI-driven language learning applications significantly improved vocabulary retention and language proficiency among students (Liang and Zhang, 2024). The study highlights that AI tools such as speech recognition and interactive exercises offer personalized feedback that caters to individual learning paces, resulting in a 35% increase in language acquisition efficiency compared to traditional methods.

Kazakhstan's emphasis on trilingual education – Kazakh, Russian, and English—has created a demand for AI-based language learning platforms such as Duolingo, which are widely used by students to improve their language skills (Osborne and Lang, 2023). Furthermore, research featured in the Journal of Computer Assisted Learning indicates that AI-powered translation tools not only assist teachers in multilingual classrooms but also enhance students' comprehension and engagement, leading to a 25% improvement in learning outcomes (Owoc, Sawicka, and Weichbroth, 2021).

Moreover, AI-powered translation tools are proving instrumental in breaking down language barriers. According to a comprehensive review in the Journal of Educational Technology & Society, these tools support seamless communication and foster inclusive learning environments, making them indispensable in today's diverse educational landscape (Qiao and Zhao, 2023).

Classification of AI Methods in Education. In recent years, the integration of AI in education has revolutionized the way students learn, and teachers instruct. As technological advancements continue to surge, AI's role in the educational sector becomes increasingly multifaceted, ranging from personalized learning experiences to administrative efficiencies.

Studies published in the Computers and Education Artificial Intelligence have demonstrated that AI-powered adaptive learning systems significantly enhance student engagement and learning outcomes (World Economic Forum, 2024). For instance, the use of AI to personalize content delivery can cater to individual learning speeds and styles, which improves overall

academic performance. One such system, BilimLand, has been shown to increase student comprehension rates by up to 40% (Daryn.online, 2024).

AI's potential in education extends beyond mere automation; it encompasses adaptive learning systems, intelligent tutoring, and predictive analytics, all designed to cater to the unique needs of students and educators. The Journal of Creative Education reports that intelligent tutoring systems, like NIS Online, can mimic the personalized attention of a human tutor, offering real-time feedback and adaptive problem-solving strategies that have been proven to boost student achievement in subjects like mathematics and science by 25% (Rincon-Flores *et al.*, 2022).

Additionally, predictive analytics powered by AI can provide valuable insights into student performance and potential challenges. According to a study of Osborne and Lang (2023), these systems can forecast student grades with an accuracy rate of over 85%, allowing educators to intervene early and offer targeted support to at-risk students (Sajja *et al.*, 2024). This pre-emptive approach has been linked to a 15% reduction in student dropout rates.

By leveraging AI, educational institutions can provide a more tailored and efficient learning environment, ensuring that each student receives the support they need to succeed. As evidence from various academic studies highlights, the integration of AI in education not only enhances the learning experience but also fosters a more inclusive and responsive educational system.

In the context of "AI Techniques in Education: A Global Overview and Applications in Kazakhstan" (Figure 1) classifies AI applications in education into five key categories based on functionality by the research group. Each category represents distinct ways AI enhances learning, teaching, administration, and research. Below is an expanded explanation of each category with global and Kazakhstan examples:

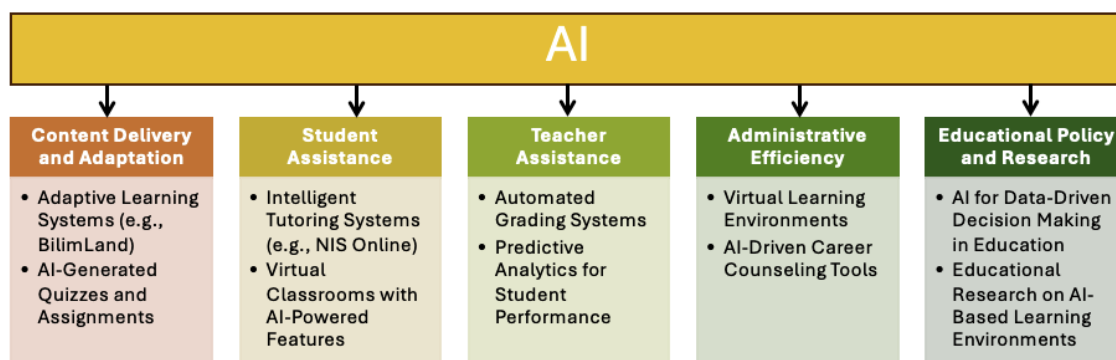


Figure 1. Classification of AI applications based on functionality

Note – compiled by the authors

AI is transforming education by enhancing learning experiences, supporting teachers, optimizing administration, and shaping policy decisions. It enables personalized content delivery, with platforms like BilimLand in Kazakhstan adapting lessons based on student progress. Student assistance is strengthened through AI-powered tutoring, such as NIS Online, and chatbot-based academic support. Teacher assistance benefits from automated grading and predictive analytics, helping educators identify struggling students. Administrative efficiency is improved via AI-driven virtual learning environments and career counseling tools used in universities. Lastly, educational policy and research leverage AI for data-driven decision-making, with Kazakhstan adopting AI-based analytics to refine its education strategies. As AI continues to evolve, its integration into education ensures personalized learning, efficient

administration, and informed policymaking, positioning Kazakhstan alongside global advancements in digital education.

Results and discussion. Kazakhstan exemplifies a distinctive scenario in the implementation of AI in education, influenced by its geographic, economic, and cultural characteristics. The government's Digital Kazakhstan effort has facilitated digital transformation across various sectors, including education. Nonetheless, obstacles persist, including disparate access to technology in rural regions and the necessity for enhancing educators' skills to properly incorporate AI into educational settings. Kazakhstan is making substantial progress in the implementation of AI-driven educational technology, especially via public-private partnerships and national education reforms, despite these hurdles. Platforms like BilimLand and Daryn Online exemplify the integration of AI inside the Kazakhstani education system.

The incorporation of AI in education offers various study opportunities from a scientific standpoint. Research may examine the effectiveness of diverse AI-based educational technologies, the influence of personalized learning algorithms on student performance, and the function of AI in closing educational disparities between urban and rural communities. A study by Jian (2023) demonstrates that AI-driven personalized learning systems can markedly enhance student engagement and performance across many educational contexts.

Furthermore, comparative studies of conventional educational methods and AI-enhanced ways may provide significant insights into optimal practices and areas necessitating future enhancement. Ellikkal and Rajamohan (2024) present data that AI-enhanced teaching approaches led to a 20% increase in student retention rates relative to traditional methods. Additionally, interdisciplinary research that amalgamates perspectives from educational psychology, data science, and public policy may yield a holistic comprehension of the integration of AI into the curriculum to improve learning results. Research by Song et al. (2024) demonstrated that the flexibility of AI technologies in diverse educational settings can promote more inclusive and equitable education systems.

Examining the ethical ramifications of AI in education is a crucial domain that necessitates scholarly investigation. Researchers ought to examine concerns including data privacy, algorithmic prejudice, and the potential for AI to intensify existing disparities. Addressing these issues through comprehensive research can aid in developing policies that guarantee the responsible and ethical application of AI in education. Memarian and Doleck (2023) conducted a paper that explored the ethical ramifications of AI in education, highlighting the necessity for transparent algorithms and equitable data practices.

Table 1 research outlines the diverse applications of AI in education, highlighting platforms that enhance learning experiences. Personalized learning systems, such as BilimLand and the Unified National Test (ENT), adapt content to individual student needs. Intelligent Tutoring Systems (ITS), exemplified by NIS Online, simulate one-on-one tutoring by providing real-time feedback. Automated grading and feedback systems, like those at Kazakh-British Technical University, reduce teachers' workload and ensure timely assessments. Virtual classrooms and AI-powered learning platforms, such as Daryn Online, facilitate interactive and remote learning experiences. Predictive analytics for student performance, employed at Al-Farabi Kazakh National University, uses data-driven insights to identify at-risk students and optimize teaching strategies. AI-based career guidance systems, like those developed by BTS Digital, help students make informed career choices. Additionally, language learning and translation tools, such as Duolingo, leverage AI for personalized language acquisition and real-time translation support. Collectively, these AI-driven innovations are shaping the future of education by enhancing personalization, accessibility, and efficiency in learning.

Table 1. Applications of AI in Education and Learning Platforms

Section	Description	Examples
Personalized Learning	Adjusts learning experience to individual needs and pace using AI.	BilimLand, Unified National Test (ENT)
Intelligent Tutoring Systems (ITS)	Simulates one-on-one tutoring with real-time feedback and support.	NIS Online
Automated Grading and Feedback Systems	Uses AI to grade assignments and provide feedback.	Kazakh-British Technical University
Virtual Classrooms and AI-Powered Learning Platforms	Facilitates real-time interaction and learning through AI.	Daryn Online
Predictive Analytics for Student Performance	Analyzes data to predict future performance and identify at-risk students.	AI-Farabi Kazakh National University
AI-Based Career Guidance Systems	Recommends career paths based on skills and interests.	BTS Digital
Language Learning and Translation Tools	Provides real-time feedback and translation for language learning.	Duolingo
<i>Note – compiled by the authors</i>		

Collaborative initiatives among academic institutions, governmental entities, and commercial sector stakeholders are crucial for fostering innovation and ensuring that AI technologies correspond with the educational objectives and requirements of Kazakhstan. Forming research consortia and financing initiatives focused on AI in education helps expedite the advancement and application of effective AI-driven solutions (Table 1). Through rigorous exploration of these domains, Kazakhstan can fully leverage AI to provide a dynamic and resilient educational framework that equips students for future problems and possibilities.

Conclusion. AI possesses the capacity to revolutionize education by providing tailored learning experiences, enhancing administrative efficiency, and assisting instructors in delivering superior training. The integration of AI in education in Kazakhstan is nascent yet exhibits significant potential. As technology becomes increasingly available and educators enhance their proficiency in using AI technologies, the influence of AI on the educational landscape in Kazakhstan is anticipated to expand.

Subsequent study ought to concentrate on assessing the efficacy of AI-driven educational technology across various contexts in Kazakhstan and investigating how AI might be utilized to tackle particular educational difficulties in the nation, including the digital divide between urban and rural regions. Huang et al. (2022) emphasize in their article that AI-driven individualized learning systems can markedly improve student engagement and performance.

Furthermore, empirical research must be undertaken to assess the effectiveness of AI-driven educational platforms such as BilimLand and Daryn Online, specifically on student engagement, retention, and academic achievement. Ali et al. (2023) present substantial evidence in their research indicating that AI-enhanced teaching methodologies resulted in a 20% improvement in student retention rates relative to conventional techniques. These investigations may utilize diverse research approaches, such as randomized controlled trials, longitudinal studies, and meta-analyses, to guarantee strong and dependable outcomes.

Furthermore, multidisciplinary research that amalgamates perspectives from educational psychology, data science, and public policy may yield a holistic comprehension of the integration of AI into the curriculum to improve learning results. Chauncey and McKenna (2023) assert that the adaptability of AI technology across various educational environments can foster a more inclusive and fair education system. This may entail assessing the scalability of AI technologies, their applicability to various educational contexts, and their contribution to promoting inclusive and equitable education.

Examining the ethical ramifications of AI in education is a vital domain that necessitates scholarly investigation. Researchers ought to examine concerns including data privacy, algorithmic prejudice, and the potential for AI to intensify existing disparities. Lim et al. (2023) underscores the imperative for transparent algorithms and equitable data practices to facilitate ethical AI inclusion in education in their Web of Science publication. Addressing these issues through comprehensive research can aid in developing policies that guarantee the responsible and ethical application of AI in education.

Collaborative initiatives among academic institutions, governmental entities, and business sector stakeholders are crucial for fostering innovation and aligning AI technology with the educational objectives and requirements of Kazakhstan. Forming research consortia and financing initiatives focused on AI in education helps expedite the advancement and application of effective AI-driven solutions. Through methodical exploration of these domains, Kazakhstan can leverage the whole capabilities of AI to establish a dynamic and robust educational framework that equips students for future challenges and possibilities.

Acknowledgements. This research has been/was/is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24993072).

I would like to express my deepest gratitude to my parents for their endless support, guidance, and encouragement throughout my academic journey. To my wife, for her unwavering patience and understanding, and to my son, who brings joy and motivation to my life.

I also extend my sincere thanks to Satbayev University for providing the academic environment that made this work possible. Furthermore, I gratefully acknowledge the support of the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under Grant No. BR24993072, which significantly contributed to the success of this research.

References

- Ahmad, I., Sharma, S., Singh, R., Gehlot, A., Gupta, L. R., Thakur, A. K., Priyadarshi, N., & Twala, B. (2024). Inclusive learning using industry 4.0 technologies: addressing student diversity in modern education. *Cogent Education*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/2331186x.2024.2330235>
- Akyuz, Y. (2020). Effects of Intelligent Tutoring Systems (ITS) on Personalized Learning (PL). *Creative Education*, 11(06), 953–978. <https://doi.org/10.4236/ce.2020.116069>
- Al-Farabi Kazakh National University. (2024). Al-Farabi Kazakh National University. Available at: <https://www.kaznu.kz/en/> (Accessed: [09 September 2024]).
- Ali, O., Murray, P. A., Momin, M., Dwivedi, Y. K., & Malik, T. (2023). The effects of artificial intelligence applications in educational settings: Challenges and strategies. *Technological Forecasting and Social Change*, 199, 123076. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.123076>
- Bilim Media Group. (2024). Over 9000 Thousand!. Available at: https://bilimland.kz/en/about_us (Accessed: [19 September 2024]).
- Bill & Melinda Gates Foundation. (2024). Continued Progress: Promising Evidence on Personalized Learning – Report. Available at: <https://usprogram.gatesfoundation.org/news-and-insights/usp-resource-center/resources/continued-progress-promising-evidence-on-personalized-learning--report> (Accessed: [6 September 2024])

- Bokayev, B., Torebekova, Z., Abdykalikova, M., & Davletbayeva, Z. (2021). Exposing policy gaps: the experience of Kazakhstan in implementing distance learning during the COVID-19 pandemic. *Transforming Government People Process and Policy*, 15(2), 275–290. <https://doi.org/10.1108/tg-07-2020-0147>
- BTS-Digital ru. (2024). BTS-Digital. Available at: <https://btsdigital.kz/> (Accessed: [21 September 2024])
- Chauncey, S. A., & McKenna, H. P. (2023). A framework and exemplars for ethical and responsible use of AI Chatbot technology to support teaching and learning. *Computers and Education Artificial Intelligence*, 5, 100182. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100182>
- Daryn.online – Білім беру платформасы. (2024). Daryn.online. (n.d.). Daryn.online – Білім беру платформасы. Available at: <https://daryn.online/> (Accessed: 6 September 2024)
- Duan, J., & Wu, S. (2024). Beyond Traditional Pathways: Leveraging Generative AI for Dynamic Career Planning in Vocational Education. *International Journal of New Developments in Education*, 6(2). <https://doi.org/10.25236/ijnde.2024.060205>
- Education Next. (2024). How Duolingo is using AI to transform language learning. Available at: <https://www.educationnext.in/posts/how-duolingo-is-using-ai-to-transform-language-learning> (Accessed: [21 September 2024])
- Ellikkal, A., & Rajamohan, S. (2024). AI-enabled personalized learning: empowering management students for improving engagement and academic performance. *Vilakshan – XIMB Journal of Management*. <https://doi.org/10.1108/xjm-02-2024-0023>
- Fakhar, H., Lamrabet, M., Echantaoui, N., Khattabi, K. E., & Ajana, L. (2024). Towards a New Artificial Intelligence-based Framework for Teachers' Online Continuous Professional Development Programs: Systematic Review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 15(4). <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2024.0150450>
- Gardner, J., & Brooks, C. (2018). Student success prediction in MOOCs. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 28(2), 127–203. <https://doi.org/10.1007/s11257-018-9203-z>
- Hazari, S. (2024, April 29). Justification and Roadmap for Artificial Intelligence (AI) Literacy Courses in Higher Education. <http://hdl.handle.net/20.500.12424/4309728>
- Huang, A. Y., Lu, O. H., & Yang, S. J. (2022). Effects of artificial Intelligence-Enabled personalized recommendations on learners' learning engagement, motivation, and outcomes in a flipped classroom. *Computers & Education*, 194, 104684. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104684>
- Jian, M. J. K. O. (2023). Personalized learning through AI. *Advances in Engineering Innovation*, 5(1), 16–19. <https://doi.org/10.54254/2977-3903/5/2023039>
- Kabudi, T., Pappas, I., & Olsen, D. H. (2021). AI-enabled adaptive learning systems: A systematic mapping of the literature. *Computers and Education Artificial Intelligence*, 2, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2021.100017>
- Liang, W.-X., & Zhang, J.-Y. (2024). Impact of AI-driven language learning apps on vocabulary acquisition among English learners. *Research Studies in English Language Teaching and Learning*, 2(1). <https://doi.org/10.62583/rselt.v2i1.32>
- Lim, T., Gottipati, S., & Cheong, M. L. F. (2023). Ethical Considerations for Artificial Intelligence in Educational Assessments. In *Advances in educational technologies and instructional design book series* (pp. 32–79). <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0205-7.ch003>
- Memarian, B., & Doleck, T. (2023). Fairness, Accountability, Transparency, and Ethics (FATE) in Artificial Intelligence (AI) and higher education: A systematic review. *Computers and Education Artificial Intelligence*, 5, 100152. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2023.100152>
- Mizumoto, A., & Eguchi, M. (2023). Exploring the potential of using an AI language model for automated essay scoring. *Research Methods in Applied Linguistics*, 2(2), 100050. <https://doi.org/10.1016/j.rmal.2023.100050>
- Namoun, A., & Alshanqiti, A. (2020). Predicting Student Performance Using Data Mining and Learning Analytics Techniques: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences*, 11(1), 237. <https://doi.org/10.3390/app11010237>
- Osborne, J. B., & Lang, A. S. (2023). Predictive Identification of At-Risk Students: Using Learning Management System Data. *Journal of Postsecondary Student Success*, 2(4), 108–126. https://doi.org/10.33009/fsop_jpss132082
- Owoc, M. L., Sawicka, A., & Weichbroth, P. (2021). Artificial Intelligence Technologies in Education: Benefits, Challenges and Strategies of Implementation. In *IFIP advances in information and communication technology* (pp. 37–58). https://doi.org/10.1007/978-3-030-85001-2_4
- Qiao, H., & Zhao, A. (2023). Artificial intelligence-based language learning: illuminating the impact on speaking skills and self-regulation in Chinese EFL context. *Frontiers in Psychology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1255594>

- Rincon-Flores, E. G., Lopez-Camacho, E., Mena, J., & Olmos, O. (2022). Teaching through Learning Analytics: Predicting Student Learning Profiles in a Physics Course at a Higher Education Institution. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 7(7), 82. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2022.01.005>
- Sajja, R., Sermet, Y., Cikmaz, M., Cwierny, D., & Demir, I. (2024). Artificial Intelligence-Enabled Intelligent Assistant for Personalized and Adaptive Learning in Higher Education. *Information*, 15(10), 596. <https://doi.org/10.3390/info15100596>
- Shadiev, R., Chen, X., & Altinay, F. (2024). A review of research on computer-aided translation technologies and their applications to assist learning and instruction. *Journal of Computer Assisted Learning*. <https://doi.org/10.1111/jcal.13072>
- Shafiq, D. A., Marjani, M., Habeeb, R. a. A., & Asirvatham, D. (2022). Student Retention Using Educational Data Mining and Predictive Analytics: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 10, 72480–72503. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3188767>
- Shoaib, M., Sayed, N., Singh, J., Shafi, J., Khan, S., & Ali, F. (2024). AI student success predictor: Enhancing personalized learning in campus management systems. *Computers in Human Behavior*, 158, 108301. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2024.108301>
- Son, J., Ružić, N. K., & Philpott, A. (2023). Artificial intelligence technologies and applications for language learning and teaching. *Journal of China Computer-Assisted Language Learning*, 0(0). <https://doi.org/10.1515/jccall-2023-0015>
- Song, Y., Weisberg, L. R., Zhang, S., Tian, X., Boyer, K. E., & Israel, M. (2024). A framework for inclusive AI learning design for diverse learners. *Computers and Education Artificial Intelligence*, 6, 100212. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100212>
- Steenbergen-Hu, S., & Cooper, H. (2013). A meta-analysis of the effectiveness of intelligent tutoring systems on K–12 students' mathematical learning. *Journal of Educational Psychology*, 105(4), 970–987. <https://doi.org/10.1037/a0032447>
- The Qazaqstan Monitor. (n.d.). Revolutionizing Kazakhstan's Higher Education through AI Integration - Qazaqstan Monitor. <https://qazmonitor.com/news/2281/revolutionizing-kazakhstans-higher-education-through-ai-integration>
- Westman, S., Kauttonen, J., Klemetti, A., Korhonen, N., Manninen, M., Mononen, A., Niittymäki, S., & Paananen, H. (2021). Artificial Intelligence for Career Guidance – Current Requirements and Prospects for the Future. *IAFOR Journal of Education*, 9(4), 43–62. <https://doi.org/10.22492/ije.9.4.03>
- World Economic Forum. (2024). Revolutionizing classrooms: How AI is reshaping global education. Available at: <https://www.weforum.org/press/2024/04/revolutionizing-classrooms-how-ai-is-reshaping-global-education/> (Accessed: [20 September 2024]).
- Zarubina, V., Zarubin, M., Yessenkulova, Z., Salimbayeva, R., & Satbaeva, G. (2024). Digital transformation of the promotion of educational services of Kazakhstani universities. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13731-023-00355-3>

Information about authors

O.N. Akylbekov – Master of Information Technology, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan, e-mail: o.akylbekov@satbayev.university, Hirsch Index: 2 ResearcherID: B-7073-2017 ORCID: 0000-0002-7188-5550 Scopus Author ID: 57860757500, +77071873636 or +77767073636

A.M. Kasenkhan – Ph.D. doctor, Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan, e-mail: A.kassenkhan@satbayev.university

S.T. Baidildinova – Master of Pedagogical Sciences, K. Sagadiyev University of International Business, Almaty, Kazakhstan, e-mail: baidildinova.s@gmail.com

АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_114
MFTAA 20.01.01

А.Т. Жетписбаева¹, Б.Ж. Медетов¹, А.Т. Ахмедиярова², Б.Е. Хамзина³, Г.Қ. Үрістимбек¹

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

E-mail: aigulji@mail.ru*

E-mail: bm02@mail.ru

E-mail: urst.gulzhazira@gmail.com

²Satbayev University, Алматы қ., Қазақстан

E-mail: aat.78@mail.ru

³С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан

E-mail: be_khamzina@mail.ru

**ЗАМАНАУИ КОМПЬЮТЕРЛІК ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ ҚОЛДАНА ОТЫРЫП,
ФИЗИКАЛЫҚ ҚҰБЫЛЫСТАРДЫ ЗЕРТТЕУГЕ АРНАЛҒАН ЗЕРТХАНАЛЫҚ
ҚОНДЫРҒЫЛАРДЫ ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ӨЗІРЛЕУ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВОК
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ
КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF LABORATORY INSTALLATIONS FOR STUDYING
PHYSICAL PHENOMENA USING MODERN COMPUTER TECHNOLOGIES**

Аңдатпа. Бұл жұмыстың мақсаты дәстүрлі зертханалық зерттеулердің сапасы мен дәлдігін сақтай отырып, компьютердің виртуалды ортасында эксперименттер жүргізу мүмкіндігін қамтамасыз ете отырып, зертханалық процестерді цифрландыру мақсатында математикалық маятникте физикалық эксперименттерге арналған электрондық зертханалық құрылғыны өзірлеу болып табылады. Оның нәтижелері оқу үдерісін жетілдіріп қана қоймай, электронды білім беру мен зертханалық құрылғыларды дамыту бойынша қосымша зерттеулерге ықпал етеді деп күтілуде.

Осы мақсатта қолданыстағы қондырғылардың көзгі жағдайын талдадық. Оның негізінде ғылыми мекемелердің зертханалық жағдайында физикалық құбылыстарды зерттеу үшін балама цифрлық эксперименттік кешендер тұжырымдалып, өзірленді. Компьютерлік көру технологиясына негізделген бұл кешендер осы мақалада келтірілген.

Зерттеу барысында ғылыми талдаудың сенімді әдістері, соның ішінде аппараттық шешімдердің теориялық негіздемесі, өзірленген бағдарламалық кешендерді эксперименттік сынақтан өткізу және эксперименттік деректерге соңғы компьютерлік өңдеу қолданылды. Мақалада сипатталған зерттеу компьютерлік көруді қолдана отырып, объектілерді анықтаудың инновациялық механизмін ұсынады, бұл өлшеу дәлдігін жақсартуға көмектеседі және физикалық эксперименттер жүргізуге жаңа мүмкіндіктер ашады.

Механика бойынша өзірленген зертханалық кешендерге аппараттық және бағдарламалық бөліктер кіреді. Бағдарламалық жасақтама сервер мен клиент модульдерінен, ал аппараттық құрал физикалық процесс жүретін негізгі көріністен тұрады. Бұл көріністе әртүрлі физикалық құбылыстар мен механика процестерін талдауға болатын математикалық маятник немесе көлбеу жазықтық сияқты әртүрлі нысандар орналасқан. Сонымен қатар, қондырғыға деректерді автоматтандырылған жинау мен өңдеуді қамтамасыз ететін микрокомпьютер мен камера кіреді.

Түйін сөздер: компьютерлік технологиялар, математикалық маятник, электрондық зертханалық жұмыстар, физикалық зертханалық зерттеулер, жасанды интеллект.

Аннотация. Целью данной работы является разработка электронного лабораторного устройства для физических экспериментов на математическом маятнике с целью оцифровки лабораторных процессов, обеспечивая возможность проведения экспериментов в виртуальной

среде компьютера при сохранении качества и точности традиционных лабораторных исследований. Ожидается, что его результаты не только улучшат учебный процесс, но и будут способствовать дальнейшим исследованиям в области электронного образования и разработки лабораторных устройств.

С этой целью нами был проведён анализ потенциала существующих установок, на основе которого были сформулированы и разработаны альтернативные цифровые экспериментальные комплексы для изучения физических явлений в лабораторных условиях научных учреждений. Эти комплексы, основанные на технологии компьютерного зрения, представлены в данной статье.

В ходе исследования применялись надёжные методы научного анализа, включая теоретическое обоснование аппаратных решений, экспериментальную апробацию разработанных программных комплексов и заключительную компьютерную обработку экспериментальных данных. Описанное в статье исследование представляет инновационный механизм идентификации объектов с использованием компьютерного зрения, что способствует повышению точности измерений и открывает новые возможности для проведения физических экспериментов.

Разработанные лабораторные комплексы по механике включают аппаратную и программную части. Программная часть состоит из серверного и клиентского модулей, а аппаратная – из основной сцены, где происходит физический процесс. На этой сцене располагаются различные объекты, такие как математический маятник или наклонная плоскость, с помощью которых можно анализировать множество физических явлений и процессов механики. Дополнительно в состав установки входят микрокомпьютер и камера, обеспечивающие автоматизированный сбор и обработку данных.

Ключевые слова: компьютерные технологии, математический маятник, электронные лабораторные работы, лабораторные исследования по физике, искусственный интеллект.

Abstract. The aim of this work is to develop an electronic laboratory device for physical experiments on a mathematical pendulum in order to digitize laboratory processes, providing the ability to conduct experiments in a virtual computer environment while maintaining the quality and accuracy of traditional laboratory research. It is expected that its results will not only improve the educational process, but will also contribute to further research in the field of e-education and the development of laboratory devices.

For this purpose, we analyzed the potential of existing devices, on the basis of which alternative digital experimental complexes for studying physical phenomena in the laboratory conditions of scientific institutions were formulated and developed. These complexes, based on computer vision technology, are presented in this article.

During the study, reliable methods of scientific analysis were used, including theoretical justification of hardware solutions, experimental testing of the developed software packages and final computer processing of experimental data. The study described in the article presents an innovative mechanism for identifying objects using computer vision, which helps to increase the accuracy of measurements and opens up new possibilities for conducting physical experiments. The developed laboratory complexes on mechanics include hardware and software parts. The software part consists of server and client modules, and the hardware part consists of the main stage, where the physical process takes place. Various objects are located on this stage, such as a mathematical pendulum or an inclined plane, with the help of which it is possible to analyze many physical phenomena and processes of mechanics. Additionally, the installation includes a microcomputer and a camera, providing automated data collection and processing.

Keywords: computer technologies, mathematical pendulum, electronic laboratory work, laboratory research in physics, artificial intelligence.

Кіріспе. Берілген зерттеулер физика саласында оқыту мен зерттеуге тиімді ықпал ететін инновациялық электронды құрылғыны жасауға бағытталған ғылыми зерттеу болып табылады. Физиканы оқытуда әртүрлі тақырыптарға сәйкес оқыту әдістері қолданылады. Олардың ішінде зертханалық жұмыстар физикалық құбылыстарды көрсетуге ең тиімді және жиі қолданылатын әдіс болып табылады. Физикалық теориялар абстрактілі болғандықтан, оларды оқушыларға түсіндіру қиын болуы мүмкін. Алайда, жеке немесе топтық физикалық эксперименттер осы абстрактілі теорияларды нақты деректерге айналдырып, оларды көрнекі түрде көрсетуге мүмкіндік береді. Зертханалық әдістер оқушыларды білімді жаттап алуға емес, оны қолдануға ынталандырады, олардың ұғымдарды түсіну дағдыларын дамытады, сондай-ақ күнделікті өмірде қолдануға көмектеседі және физикаға деген оң көзқарас қалыптастырады.

Қазіргі таңда технологиялардың дамуы, әсіресе білім мен ғылым салаларында, оқыту және зерттеу үдерістерін жетілдіруде маңызды рөл атқарады. Осы эволюция аясында физикалық құбылыстарды көрсету және модельдеу мүмкіндігі бар электронды зертханалық құрылғыларды әзірлеуге үлкен көңіл бөлінуде. Бұл тұрғыда математикалық маятниктегі физикалық эксперименттерге арналған электронды зертханалық құрылғыны жасау мәселесі өзекті болып отыр.

Бұл мақаланың мақсаты – жасанды интеллект заманауи технологиялар мен әдістерді пайдалана отырып, математикалық маятниктің қозғалысын модельдеуге және визуализациялауға қабілетті электронды құрылғы жасау. Мұндай құрылғы қолданушыларға тәжірибелер жүргізуге, деректерді талдауға және нақты уақыт режимінде кері байланыс алуға мүмкіндік береді деп болжануда. Бұл мақсатқа жету үшін бағдарламалық жасақтаманы әзірлеудің заманауи әдістерін бейімделген жасанды интеллектпен біріктіру ұсынылады, бұл әртүрлі деңгейдегі дайындықтары бар қолданушыларға интуитивті әрі икемді интерфейс жасауға мүмкіндік береді.

Қазіргі ақпараттық-коммуникациялық технологиялардың дамуы интернетке қосылған, техникалық жабдықтары бар және веб-сервистерді қолданатын электрондық зертханаларды жасау мен пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл физикадағы білім беру стратегиясының бірі, оны «экспериментке негізделген интеграцияланған электрондық оқыту» деп атайды, мұнда эксперименттер қашықтан, интернет арқылы жүзеге асырылады. Зерттеушілер мектептерде эксперименттік интернет жүйесін аппараттық компонент ретінде, ал веб-басқару жинағын бағдарламалық компонент ретінде қолданып, қашықтағы зертхана жүйесін ұсынады. Олардың айтуынша, бұл тәсіл арқылы зертханалық эксперименттерді ешқандай арнайы жабдықсыз және бағдарламалаусыз, камералар мен графиктер сияқты дайын блоктарды пайдаланып, оңай жүргізуге болады. Бұл жүйе қазір жоғары оқу орындары мен мектептерде кеңінен қолданылып, эксперименттердің психологиялық аспектілерін де зерттеуге мүмкіндік береді (Schauer, 2018).

Тағы бір стратегия – физикалық зертханаларға балама ретінде виртуалды зертханаларды енгізу. Зерттеушілердің пікірінше, бұл әдіс студенттерге физиканың ғылыми принциптерін түсінуге көмектесудің тамаша құралы болып табылады. Виртуалды зертханалар арқылы автоматтандырылған және компьютерлік модельдеуге негізделген тәжірибелер жүргізіледі. Көптеген ғалымдар виртуалды зертханалардың қолжетімділігі, икемділігі мен тиімділігін бағалап, олардың білім беру үдерісіне оң әсер ететінін атап өтті. Олар студенттердің академиялық жетістіктерін арттырып, физиканы оқуға деген қызығушылықты оятатынын дәлелдеді (El Kharki et al., 2021).

Зерттеушілер мектептерде физиканы оқыту үшін виртуалды зертханаларды пайдаланудың қолжетімділігін, икемділігін, құнын және тиімділігін зерттей отырып, мұндай пакет арзан болғанына қарамастан қолжетімді, икемді және оқушылардың үлгеріміне оң әсер етеді деген қорытындыға келді. Виртуалды зертханалар мобильді құрылғылар мен интернетке бейімделуі керек және олардың тиімділігін арттыру үшін Үкімет қаржыландыруы керек деп ұсынылды (Falode, 2017). Тағы бір стратегия виртуалды модельдер нақты эксперименттерге қабаттасатын осы AR технологияларын пайдалануды қамтиды (Freese et al., 2023). Сарапшылардың пікірінше, AR дерексіз ғылыми идеяларды зерттеуді көрнекі және қызықты ету арқылы жаратылыстану ғылымдарын қабылдауды айтарлықтай жақсарты алады. AR технологиясы эксперименттерді интерактивті түрде жүргізуге және әртүрлі ғылыми құбылыстарды, соның ішінде физикалық тұжырымдамаларды зерттеуге мүмкіндік береді (Jiang et al., 2022).

AR құралдары қарапайым және қолжетімді шешімді ұсынады, әсіресе онлайн оқыту кезінде пайдалы. Интерактивті 3D модельдері бар AR қосымшалары пайдаланушыларға тактильді өзара әрекеттесу арқылы схемалар мен компоненттерді визуализациялауға,

басқаруға және зерттеуге мүмкіндік береді. Зерттеулер дәстүрлі оқыту әдістерімен салыстырғанда есте сақтау мен физикалық ұғымдарды түсінудің айтарлықтай жақсарғанын көрсетті. Осылайша, AR құралдары физика сияқты жаратылыстану ғылымдарын оқытуды жақсартуға ықпал ететін дәстүрлі, қауіпті және қымбат зертханаларға тиімді балама бола алады (Mukhtarkyzy et al., 2022).

Тағы бір зерттеуде ғалымдар кеңейтілген шындық технологиялары мен сенсорларды қолданудың оқушылардың үлгерімі мен оқу процесіне әсерін талдап, олардың осы технологиялармен байланысын зерттеді. Зерттеу біріктірілген әдісті қолдану арқылы жүргізілді. Нәтижелер AR қолдану визуалды және мәтіндік элементтерді қосу арқылы оқу процесін жақсартып отырып, физиканы оқытуда тиімді екенін көрсетті. AR көмегімен интеграцияланған оқу ортасында оқушылар белсендірек, ыңғайлы болды, физика сұрақтарына жақсы жауаптар көрсетті, сенімдірек болды және жоғары академиялық нәтижелер көрсетті. Сонымен қатар, зерттеу AR-ны дербес оқыту құралы ретінде емес, зертханалық сабақтар мен нақты эксперименттерге қосымша ретінде қарастыру керек екенін атап өтті (Mustafa, 2020). Дене шынықтыру саласындағы зерттеулер сонымен қатар тиімді оқыту дәстүрлі және цифрлық әдістерді біріктіруді қажет ететінін көрсетеді. ELearning білім беру сапасын арттыра отырып, неғұрлым белсенді және сындарлы оқу ортасын жасайтын әртүрлі виртуалды эксперименттерді пайдалануды қамтиды (Ionascu, 2022).

Аралас оқыту тұжырымдамасы әсіресе зертханалық сабақтарды виртуалды эксперименттермен ауыстыру қажет болған пандемия кезеңінде өзекті болды. Мектептер инфекцияның таралу қаупін азайту үшін гибриді оқыту түрлерін қолданды. Студенттер зертханаларда қатысуды үйдегі эксперименттермен алмастырды. Оқытудың бұл түрі ең тиімді болып шықты (Ionascu et al., 2022). Демонстрациялар мен зертханалық жұмыстар ғылыми-техникалық пәндерде дайындық үшін таптырмас болып қала береді, өйткені олар оқушылардың білімін нығайтуға және аналитикалық қабілеттерін дамытуға көмектеседі. Нақты және виртуалды эксперименттердің нәтижелерін салыстыру мүмкіндігі тақырыпты түсінуді айтарлықтай жақсартады. Біріктірілген зертханалық жабдықтары мен нақты басқару жүйелері бар қолжетімді бұлттық платформаларды әзірлеу эксперименттерді жақсырақ және тиімдірек жүргізуге мүмкіндік береді, бұл әзірлеушілер студенттердің шығармашылық өзін-өзі тәрбиелеуін ынталандырады деп санайды (Stepan et al., 2022). Басқа зерттеушілер осы тақырыптарды зерттеу және түсіну үшін "Easy Java Simulations" құралымен жасалған виртуалды зертхананы ұсынды. Пайдаланушылар кіріс векторларының компоненттерін енгізе алады және жақсы қабылдау үшін масштабтауға және айналдыруға болатын үш өлшемді визуализацияларды ала алады. Кез-келген операцияны таңдау нәтижелерді сандық және графикалық форматта көрсетуге әкеледі. Пайдаланушы ұсынылған векторлардың кез келгенін өзгерте алады, ал нақты уақыттағы виртуалды зертхана бұл өзгерістердің соңғы нәтижелерге қалай әсер ететінін көрсетеді. Сондай-ақ шамасы немесе бағыты бойынша өзгерістерді шектеу функциясы бар. Бұл виртуалды зертхананың тиімділігі студенттердің екі тобының нәтижелерін талдау арқылы (біреуі виртуалды зертхананы, екіншісі дәстүрлі әдістерді қолданды) және қанағаттану сауалнамасы арқылы тексерілді (Salinas, 2019).

Компьютерлік модельдеу модельдеу арқылы табиғи құбылыстарды зерттеу үшін физиканы оқытуды қоса алғанда, әртүрлі ғылыми пәндерде белсенді қолданылады. Зерттеушілер компьютерлік модельдеу туралы заманауи пікірталастардың әртүрлі аспектілерін, соның ішінде соңғы жылдары мектептерде физиканы оқытуда қолданылатын модельдеу түрлерін қарастырды. Олар сондай-ақ ғылыми модельдеудің заманауи философиялық көзқарастарын және оқу процесіне қандай аспектілерді енгізуге болатынын зерттеді. Олардың ішінде модельдеудегі модельдердің рөлі, модельдеу мен

эксперимент арасындағы байланыс, алынған білімнің сенімділігі, сондай-ақ модельденген процестердегі анимацияның рөлі бар. Бұл тұжырымдар студенттерге ғылыми қызмет туралы толық түсінік алуға, келіп түскен ақпаратты талдауға және саналы азаматтық ұстанымды қалыптастыруға көмектеседі (Seoane et al., 2022; Gunawan et al., 2017; Gunawan et al., 2018; García-Vela et al., 2020).

Материалдар және зерттеу әдістері. Тербелістерді зерттеу үшін біз жасаған модульдік эксперименттік қондырғы (меу) «математикалық маятник» көмегімен физикалық экспериментті қалай жақсартуға болатынын қарастырыңыз. Орнату жұмысы физикалық процесті бақылау жүйесін қолдануға негізделген.

Меу «математикалық маятник» – бұл қорап тәрізді құрылым, оның ішінде математикалық маятникті құрайтын жіпке салмақ ілулі. Маятникке Raspberry Pi 4 Model B шағын компьютері және арнайы камерасы бар басқару модулі бекітілген (1-сурет). Сахна камера түсірген бейнежазбаларда қозғалатын заттардың көлеңкелері болмай-тындай етіп жарықтандырылады-жарық тікелей камераға түседі. Орнатудың барлық элементтері бір-бірімен байланысты, сонымен қатар мұғалім немесе оқушы басқаратын ноутбукке немесе компьютерге қосылған.

Жүк ретінде ұзындығын реттеуге болатын жіпке ілінген металл шар қолданылады. Маятник қолмен ауытқиды және ол тербеле бастайды. Маятниктің қозғалысы сандық камерамен түсіріледі, содан кейін бейнежазба өңдеу үшін микрокомпьютерге жіберіледі, содан кейін нәтижелер компьютер экранына шығарылады. 1-суретте камераның бейне кадрлары мониторда қалай көрсетілетіні көрсетілген. Орнатудың барлық бағдарламалық жасақтамалары Raspberry Pi 4 Model B микрокомпьютері арқылы жүзеге асырылады.



1-сурет. Математикалық маятниктің қозғалыс заңдылықтарын зерттеуге арналған әзірленген құрылғының түрі

Ескерту – авторлар құрастырған

Алюминий жақтау: құрылым стандартты алюминий профильдерінен жасалған, бұл оның беріктігі мен жеңілдігін қамтамасыз етеді. Жіптегі металл шары бар маятник: тербеліс заңын көрсету немесе тербеліс кезеңін өлшеу сияқты әртүрлі физикалық

эксперименттер жүргізу үшін қолданылады. Панельдер: өлшемдердің дәлдігін жақсарту және сыртқы факторлардың әсерін азайту үшін жабық кеңістік құру арқылы бүйірлерді, сондай-ақ артқы және негізді жабады.

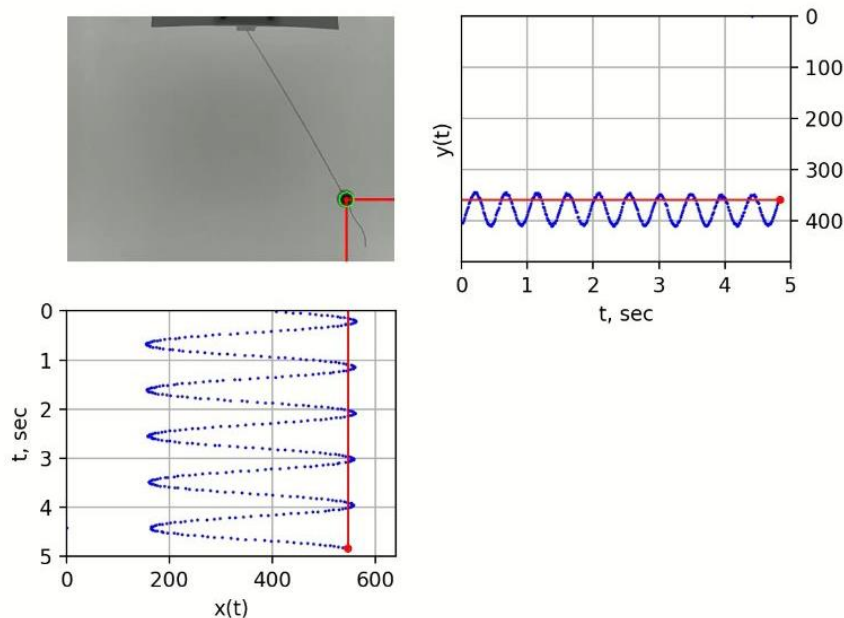
Орнату жақтауы құрылымның жеңілдігі мен беріктігін қамтамасыз ететін алюминий профильдерінен жасалған. Орнатудың алдыңғы жағында маятниктің қозғалысын жазу және талдау үшін Raspberry Pi камерасы орналасқан. Бұл қондырғының ерекшелігі-маятниктің артқы жағында орналасқан жарықдиодты жолақтың болуы. Жарықтандыру екі себеп бойынша маятниктің қозғалысын талдау дәлдігінде маңызды рөл атқарады:

Жарықдиодты жолақ тұрақты және тұрақты жарықтандыруды қамтамасыз етеді, бұл сыртқы жарық көздерінің әсерін болдырмайды және кез келген жарық жағдайында эксперименттер жүргізуге мүмкіндік береді. Кескіннің анықтығы: маятниктің жарқын және бағытталған жарықтандыруы кескіннің жоғары сапасын қамтамасыз етеді, бұл бейне деректерін өңдеуді жеңілдетеді және қозғалысты тану және бақылау алгоритмдерінің дәлдігін жақсартады (1-сурет).

Деректерді түсіру және өңдеу процесі. Raspberry Pi 4 Model B микрокомпьютерінде компьютерлік көруді жүзеге асыруға арналған бағдарламалардан басқа (Python тіліндегі OpenCV кітапханасын пайдалана отырып) біз веб-қосымша түрінде пайдаланушы графикалық интерфейстерін әзірледік. Бұл интерфейстер сабақтың екі түрін қолдайды: 1) демонстрациялық сабақ, мұнда теориялық материал объектінің қозғалысын визуализациялаумен бірге жүреді, мысалы, математикалық маятник және 2) қозғалыстың кинетикалық сипаттамаларын өлшеуге мүмкіндік беретін эксперименттік сабақ.

Екі жағдайда да қозғалыс процесі алдымен камераға жазылады, содан кейін OpenCV кітапханасынан компьютерлік көру әдістерін қолдана отырып, суреттегі объектінің орнын анықтау үшін әр кадр талданады. Бұл X және y координаттарының уақыт бойынша графигін құруға мүмкіндік береді.

2-суретте маятниктің қозғалысы синусоид түріндегі гармоникалық функциямен сипатталатынын көрсететін демонстрациялық сабақ интерфейсі көрсетілген.



2-сурет. Computer vision арқылы маятникті бақылау

Ескерту – авторлар құрастырған

Жоғарғы сол жақ сурет:

- бұл камера түсірген бейненің кадры. Ол нақты уақыт режимінде бақыланатын маятникті көрсетеді. Қызыл сызықтар координаталық осьтерді көрсетеді, ал жасыл шеңбер маятниктің ағымдағы орнын көрсетеді.

Жоғарғы оң жақ график:

- бұл график уақыт бойынша $y(t)$ координатының өзгеруін көрсетеді. Абсцисса осі бойынша уақыт (секундтар), ординат осі бойынша – маятниктің тігінен орналасуы. Маятник бастапқы нүктенің айналасында тербеліс жасайтынын көруге болады. Тербеліс амплитудасы біртіндеп азаяды, бұл маятниктің әлсіреген тербелістерін көрсетеді.

Төменгі сол жақ график:

- бұл графикте $x(t)$ координатының уақытқа тәуелділігі көрсетілген. Абсцисса осі бойынша маятниктің көлденең орналасуы, ординат осі бойынша уақыт (секунд) қойылады. Маятник біртіндеп азаятын амплитудасы бар гармоникалық тербелістер жасайтынын көруге болады.

Тәжірибе барысында Raspberry Pi және камера көмегімен маятниктің траекториясы сәтті бақыланды. Бейне деректері компьютерлік көру технологиясын қолдана отырып өңделді, бұл уақыт бойынша $x(t)$ және $y(t)$ координаттарының өзгеру графиктерін құруға мүмкіндік берді. Осы мәліметтер негізінде маятниктің динамикасын одан әрі талдауға, жүйенің физикалық сипаттамаларын зерттеуге болады.

Веб-бағдарлама бірнеше көріністерден тұрады, олардың әрқайсысы белгілі бір тапсырманы орындайды:

«Индекс» функциясы

Index функциясы негізгі бетке GET сұрауларын өңдейді. Ол пайдаланушыға жүйенің негізгі мүмкіндіктеріне қол жеткізуге мүмкіндік беретін веб-интерфейсті бастапқы жүктеуге жауап береді.

Lab функциясы зертханалық сабақтар парағы үшін қолданылады. Ол оқу материалдарына қол жеткізуге мүмкіндік береді және пайдаланушыға оқу процесінің бөлігі ретінде әртүрлі эксперименттік қондырғылармен өзара әрекеттесуге мүмкіндік береді.

Start_video функциясы камерада бейнені жазу және оны 'start_camera' функциясы арқылы файлға сақтау үшін post сұрауларын өңдеуге жауап береді. Бұл функция екі параметрді қабылдайды:

-video_name – бейне Файл атауы.

-video_time – жазу ұзақтығы секундпен.

Бейнені жазу үшін келесі параметрлер орнатылады:

- кадр жиілігі: секундына 90 кадр.

- бейне ажыратымдылығы: ені 640 пиксель, биіктігі 480 пиксель.

Cv2 нысаны жасалады. Videowriter ' OpenCV кітапханасын пайдаланып берілген параметрлермен (кодек, кадр жиілігі, ажыратымдылық) файлға бейне жазу үшін.

'Demo_video' функциясы бейнені өңдеуге, кадрлардағы шеңберлерді бөлуге және нәтижені 'video_circle_detection' функциясы арқылы бейне файлға сақтауға арналған сұранысты өңдейді. Бұл функция уақыт өте келе объектінің тігінен және көлденеңінен қозғалу графиктерін салады. Ол үшін келесі қадамдар орындалады:

- бейнеден кадрларды оқу және оларды сұр реңктерге айналдыру.

- шуылды тегістеу үшін медианалық бұлыңғырлықты қолдану.

- houghcircles (OpenCV кітапханасының ' HoughCircles') әдісін қолдана отырып, кадрдағы шеңберлерді іздеңіз.

'Approx_video' функциясы 'video_approximation' функциясын қолдана отырып, бейнедегі объектінің қозғалысын жуықтау үшін сұранысты өңдейді. Ағымдағы сәтке дейінгі әрбір уақыт қадамы үшін 'fit_to_sine' функциясын қолдана отырып, қозғалатын объектінің X және y координаттарын жуықтау орындалады. Шығу ағымдағы уақыт қадамы үшін графиктерді жасайды: жақтаулы кескін, $y(t)$ графигі және $x(t)$ графигі.

Маятниктің қозғалысын бақылаудан және жуықтауды орындаудан басқа, әзірленген жүйе маятниктің бұрыштық жылдамдығы мен үдеуін есептеуге мүмкіндік береді. Ол үшін келесі қадамдар қолданылады:

- маятниктің бұрыштық жылдамдығы маятниктің уақыт бойынша ауытқу бұрышының туындысы ретінде анықталады. Маятниктің бұрыштық орналасуы синусоидалы функциямен жуықталғандықтан, бұрыштық жылдамдықты жуықтау функциясын саралау арқылы алуға болады.

Бұрыштық үдеуді есептеу:

- маятниктің бұрыштық үдеуі уақыт бойынша бұрыштық жылдамдықтың туындысы ретінде анықталады. Бұл мәнді маятниктің бұрыштық позициясының екінші туындысын есептеу арқылы алуға болады.

Практикалық іске асыру:

- синусоидалы жуықтау параметрлерін қолдана отырып, бұрыштық жылдамдық пен үдеуді уақыттың әр нүктесі үшін есептеуге болады. Жуықтау параметрлерінің мәндері (амплитудасы, жиілігі және фазалық сдвиг) туындыларды аналитикалық түрде анықтауға мүмкіндік береді, бұл бұрыштық жылдамдық пен үдеудің нақты мәндерін береді.

Бұл жұмыста маятниктің қозғалысын бақылау мәселесін шешу үшін заманауи веб-әзірлеу және компьютерлік көру технологияларын қолдану болып табылады.

Қорытынды. Маятниктің қозғалысын бақылауға және оның тербелістерін компьютерлік көру және деректерді өңдеу әдістерін қолдана отырып талдауға арналған эксперименттік қондырғыны әзірлеу және сынау үшін жасалған. Негізгі мақсат маятниктің қозғалысын түсіріп қана қоймай, сонымен қатар траекторияларды жуықтауды және бұрыштық жылдамдықтар мен үдеулерді есептеуді қоса, деректерді одан әрі талдауды жүзеге асыра алатын сенімді және дәл жүйені құру болды.

Қорытындылай келе, бұл жұмысты жүзеге асыру электронды құрылғыларды әзірлеу және оларды білім беру мақсатында қолдану саласында құнды тәжірибе алуға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер оқу процесін одан әрі жақсарту және студенттердің физиканы оқуға деген қызығушылығын арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс. Осы техникалық шешімді зерттеу және әзірлеу ҚР Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант AP19677321 – Заманауи компьютерлік технологияларды қолдана отырып, оқу орындарының зертханалық жағдайында физика құбылыстарын зерттеуге арналған цифрлық эксперименттік қондырғыларды әзірлеу (2023-2025 жж.)).

Әдебиеттер тізімі

- Schauer, F. (2018). An easy-to-build remote laboratory with data transfer using the Internet School Experimental System. *European Journal of Physics*, 29(4), 753-765.
- El Kharki, K., Berrada, K., Burgos, D. (2021). Design and implementation of a virtual laboratory for physics subjects in Moroccan universities. *Sustainability*, 13(7), 37-11.
- Falode, A. (2017). Evaluation of Virtual Laboratory Package on Nigerian Secondary School Physics Concepts. *Turkish Online Journal of Distance Education*, 13(2), 168-173.
- Freese, M., Teichrew, A. (2023). Measuring teachers' competencies for a purposeful use of augmented reality experiments in physics lessons. *Frontiers in Education*, 54(5), 3-10.

- Jiang, S., Tatar, C., H. (2022). Augmented Reality in Science Laboratories: Investigating High School Students' Navigation Patterns and Their Effects on Learning Performance. *Journal of Educational Computing Research*, 60(3), 777-803.
- Mukhtarkyzy, K., Abildinova, G., Sayakov, O. (2022). The Use of Augmented Reality for Teaching Kazakhstani Students Physics Lessons. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 17(12), 215-235.
- Mustafa, S. (2020). The Effect of Using Augmented Reality and Sensing Technology to Teach Magnetism in High School Physics. *Technology, Pedagogy and Education*, 29(4), 407-424.
- Ionascu, C., Jipa, A. (2022). Virtual experiments for measuring fundamental physical quantities. *Romanian Reports in Physics*, 74(911), 215-235.
- Ionascu, C., Jipa, A. (2022). Virtual experiments for measuring fundamental physical quantities. *Romanian Reports in Physics*, 74(911), 3-10.
- Stepan, M., Marie, H., Roman, L. (2022). Alternative Forms of Laboratory Teaching during the Lockdown Period Caused by the COVID-19 Pandemic. *International Journal of Information and Education Technology*, 12(11), 1137-1147.
- Salinas, I. (2019). Design and evaluation of a three-dimensional virtual laboratory on vector operations. *Computer Applications in Engineering Education*, 27(3), 690-697.
- Seoane, M. E., Greca, I. M., Arriasecq, I. (2022). Epistemological aspects of computational simulations and their approach through educational simulations in high school. *Simulation*, 98(2), 87-102.
- Gunawan, G., Harjono, A., Sahidu, H., & Herayanti, L. (2017). Virtual laboratory to improve students' problem-solving skills on electricity concept. *J. Pendidik. IPA Indones.* 2017, 6, 257-264. <https://doi.org/10.15294/jpii.v6i2.9481>
- Gunawan, Harjono, A., Sahidu, H., & Nisrina (2018). Improving students' creativity using cooperative learning with virtual media on static fluida concept. *Journal of Physics: Conference Series*, 1006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1006/2F1006/2F1%2F012016>
- García-Vela, M., Zambrano, J.L., Falquez, D.A., Pincay-Musso, W., Duque, K.B., Zumba, N.V., Barcia, M.B., Méndez, J.I., Valverde, P.E., Romero-Crespo, P.L., et al. (2020). Management of virtual laboratory experiments in the geosciences field in the time of COVID-19 pandemic. In *Proceedings of the ICERI2020 Conference*, Seville, Spain, 9, 8702-8711. <https://doi.org/10.21125/iceri.2020.1925>

Information about authors

Zhetpisbayeva Ainur – PhD, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: aigulji@mail.ru, +77079779528 ORCID ID: 0000-0002-4525-5299

Medetov Bekbolat – PhD, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: bm02@mail.ru, +77072098413 ORCID ID: 0000-0002-5594-8435

Akhmediyarova Ainur – PhD, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: aat.78@mail.ru,

Botagoz Khamzina – Doctor of pedagogical sciences, associate professor, Seifullin University, Kazakhstan, Astana, E-mail: be_khamzina@mail.ru, +77025884663 ORCID ID: 0000-0002-0552-7464

Gulzhazira Uristimbek – graduate student, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: urst.gulzhazira@gmail.com, +77073312001

АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_123
MPHTI 20.53.19 01

Г. Жомартқызы¹, К.А. Павлов¹, М.Ж. Базарова²

¹Восточно Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,

г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: gzhomartkyzy@edu.ektu.kz*

E-mail: pavlov.kanstantin@gmail.com

²Восточно Казахстанский университет им. С. Аманжолова, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: madina9959843@gmail.com

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНКИ СХОДИМОСТИ СТРУКТУР ДАННЫХ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МНОЖЕСТВ И АЛГОРИТМА ЛЕВЕНШТЕЙНА**

**МАТЕМАТИКАЛЫҚ ЖИЫНДЫ ЖӘНЕ ЛЕВЕНШТЕЙН АЛГОРИТМІ НЕГІЗІНДЕ
ДЕРЕКТЕР ҚҰРЫЛЫМДАРЫНЫҢ ЖИНАҚТЫЛЫҒЫН БАҒАЛАЙТЫН
САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EVALUATION OF THE CONVERGENCE OF DATA
STRUCTURES USING MATHEMATICAL SETS AND THE LEVENSHTAIN ALGORITHM**

Аннотация. В данной работе описано сравнение двух методов оценки сходимости различных наборов данных: математических множеств и алгоритма Левенштейна. Приведено описание общей методологии вычисления сходимости данных: анализ первичных данных, очистка данных, построение множества данных, применение алгоритма Левенштейна и расчет сходимости. Приведены этапы оценки сходимости данных с общей структурой. Цель оценки сходимости данных с общей структурой состоит в том, чтобы определить, насколько хорошо модель или теория объясняет наблюдаемые данные. Для улучшения показателей сходимости данных был выбран алгоритм Левенштейна из набора алгоритмов на основе семантического поиска. Во второй части статьи проводится сравнительный анализ этих двух методов на примере нескольких наборов данных.

Перед выполнением вычислений сходимости данных была проведена предварительная очистка с использованием стандартных методов интеллектуального анализа данных (data mining), реализованных на языке программирования Python. Также была выполнена нормализация полей в структуре данных, что было особенно важно при работе с реляционными базами данных для обеспечения корректной интерпретации и сопоставимости результатов. Приведены результаты сравнительного анализа представленных методов и дан ряд рекомендаций по выбору наиболее эффективного метода оценки сходимости структур данных в зависимости от конкретных требований и условий.

Ключевые слова: репликация, сходимость данных, ERP системы, алгоритм Левенштейна, множества, базы данных.

Аңдатпа. Бұл жұмыста әртүрлі деректер жиынтығының жинақтылығын бағалайтын екі әдістің салыстырмасы сипатталған: математикалық жиынтық және Левенштейн алгоритмі. Мақаланың бірінші бөлімінде мәліметтер жиынтығын талдау, тазалау және құру кезеңдерінен тұратын мәліметтер құрылымдарының жинақтылығын бағалайтын жалпы әдіснамасы сипатталады. Ортақ құрылымды деректер жинақтылығын бағалау кезеңдері берілген. Ортақ құрылымды деректер жинақтылығын бағалаудың мақсаты – модель немесе теория бақыланатын деректерді қаншалықты дұрыс бейнелейтінін анықтау. Деректер жинақтылығын бойынша көрсеткіштерді жақсарту үшін семантикалық іздеуге негізделген алгоритмдер жиынтығынан Левенштейн алгоритмі таңдалды. Мақаланың екінші бөлігінде бірнеше деректер жиынтығының мысалымен жүзеге асырылатын осы екі әдістің салыстырмалы талдауы келтіріледі. Деректер жинақтылығын есептеуді орындас бұрын, Python бағдарламалау тілінде

енгізілген стандартты деректерді интеллектуалды талдау әдістерін қолдану арқылы алдын ала тазалау жүргізілді. Деректер құрылымындағы өрістерді нормалау да орындалды, бұл нәтижелердің дұрыс интерпретациялануын және салыстырылуын қамтамасыз ету үшін реляциялық мәліметтер базасымен жұмыс істегенде маңызды болды. Ұсынылған әдістердің салыстырмалы талдау нәтижелері көрсетіледі және сонымен қатар нақты талаптар мен шарттарға байланысты деректер құрылымдарының жинақтылығын бағалаудың ең тиімді әдісін таңдау бойынша бірқатар ұсыныстар беріледі,

Түйін сөздер: репликация, деректерді жинақтылығы, ERP жүйелер, Левенштейн алгоритмі, жиынтықтар, мәліметтер базасы.

Abstract. This paper describes a comparison of two methods for evaluating the convergence of different data sets: mathematical sets and the Levenshtein algorithm. The first part of the paper describes a general methodology for evaluating the convergence of data structures, including the steps of analyzing, cleaning, and constructing data sets. The stages of assessing data convergence with a common structure are presented. The goal of assessing data convergence with a common structure is to determine how well a model or theory explains the observed data. To improve data convergence metrics, the Levenshtein algorithm was selected from a set of algorithms based on semantic search. In the second part of the paper, a comparative analysis of the two methods is performed using several data sets as examples. Before performing data convergence calculations, preliminary data cleaning was carried out using standard data mining techniques implemented in the Python programming language. In addition, normalization of fields within the data structure was performed, which was particularly important when working with relational databases to ensure accurate interpretation and comparability of the results. The results of the comparative analysis of the presented methods are given and a number of recommendations are given for choosing the most effective method for evaluating the convergence of data structures depending on specific requirements and conditions.

Keywords: replication, data convergence, ERP systems, Levenshtein algorithm, sets, databases.

Постановка проблемы. Метрика сходимости структур данных (индекс разнообразия) в реляционных БД имеет узконаправленный характер и в первую очередь показывает, насколько эффективно и точно могут быть созданы представления на основе типов данных полей в таблицах (Рыбанов, 2019), однако данная метрика не учитывает их семантический смысл (Hedge, 1993). Проблема создания общей структуры данных на основе уже имеющихся наборов, которые прошли все этапы предобработки и нормализации, встает, например, в области репликации, где данные загружаются из различных источников. Конкретным примером является концепция ETL (Pishghadam, 2011), которая описывает этапы работы с информацией для успешной репликации между различными информационными системами или источниками информации. В ней на этапе извлечения информации встает проблема создания эффективной структуры для хранения собранной информации, и на данный момент такая структура является унифицированной (Piatini et al., 2001).

Основой для таких хранилищ, использующих ETL-подход, служат хранилища данных Hadoop, Apache Hive, NoSQL базы данных и различного рода реляционные базы данных. Поэтому в большинстве случаев при возникновении такого рода задач специалистам приходится создавать пользовательские структуры данных, со своим набором полей, такие как таблицы и представления в реляционных базах данных, кластеры данных Hadoop и различного рода облачные хранилища.

Рассмотренный подход к репликации данных устанавливает общие положения и наборы операций, необходимых для осуществления процесса репликации в целом. Программный подход к репликации, в частности репликация с помощью API middleware (Lin et al., 2005), используется для улучшения производительности загрузки данных, их чтения и записи в целевую систему, вследствие чего имеет более организованную первоначальную структуру данных, однако и такой подход не лишен недостатков. Например, в случае с Master-slave репликацией (ведущий-ведомый) (Cecchet et al., 2008), относящейся к API middleware подходу, доступ к информации возможен только для

чтения на ведомых узлах, а обновления передаются на ведущий. В этом случае может возникать неконсистентность данных, влияющих на всю структуру получаемых данных.

Методы исследования. В работе предлагается общая модель для сравнения нескольких структур тестовых данных для создания общей структуры с использованием математических множеств и алгоритма Левенштейна, который призван улучшить сходимость полей из нескольких наборов данных, а также увеличить индекс подобия.

Показатель сходимости данных отражает степень соответствия данных между различными таблицами или источниками в рамках создания общей структуры в реляционных базах данных (Рыбанов, 2020).

Показатель сходимости данных может быть определен как мера того, насколько полно и точно данные из разных источников совпадают в отношении определенного набора атрибутов или полей. Чем выше значение сходимости данных, тем более точно данные соответствуют друг другу и тем более надежна общая структура базы данных.

Цель оценки сходимости данных с общей структурой состоит в том, чтобы определить, насколько хорошо модель или теория объясняет наблюдаемые данные, и использовать эту информацию для улучшения модели или теории в будущем (Moshvedi, 2019).

Оценка сходимости данных с общей структурой включает в себя следующие этапы:

1. Формулирование модели: определение математической модели или теории, которая предсказывает общую структуру данных.

2. Сбор данных: сбор данных, которые будут использоваться для проверки модели.

3. Оценка соответствия: оценка того, насколько хорошо данные соответствуют модели. Это может включать в себя сравнение прогнозов, сделанных на основе модели, с фактическими данными, а также анализ остатков - расхождений между прогнозами и фактическими данными.

4. Оценка значимости: оценка значимости результатов и определение, насколько вероятно, что различия между моделью и данными являются статистически значимыми или случайными.

5. Интерпретация результатов: анализ результатов и интерпретация их в контексте исходной модели или теории.

Для построения общей структуры наборов данных в качестве хранилища загруженных данных предлагается использовать простейший способ выявления общих полей – пересечение математических множеств. Данный способ является простейшим в программной реализации и может быть применен без каких-либо специальных знаний в этой области. Для улучшения показателей сходимости данных из набора алгоритмов на основе семантического поиска был выбран алгоритм Левенштейна по ряду причин:

1. В исследовании (Anju et al., 2016) алгоритм Левенштейна показал хорошие результаты точности на наборе простых структурированных данных, коими являются наименования полей данных из ERP систем.

2. Гибкость. Алгоритм Левенштейна позволяет измерять семантическую разницу между строками, учитывая различные операции с данными, такими как вставка, удаление и замена символов. Это позволяет наиболее гибко производить сравнение и поиск строк, даже если они отличаются несколькими операциями редактирования.

3. Простота реализации. Алгоритм Левенштейна относительно прост для понимания и реализации. Он широко применяется в динамическом программировании и может быть реализован как рекурсивная функция или в виде таблицы для сохранения промежуточных результатов. Это делает его доступным для широкого круга разработчиков и позволяет легко интерпретировать данный алгоритм на языке Transact-SQL.

Перед вычислением сходимости нужно провести очистку данных, воспользовавшись стандартными инструментами data mining, на любом из языков программирования, к

примеру – Python. Также поля в структуре данных должны быть нормализованы, в случае если они используются в реляционных базах данных. В целом общая методология для вычисления сходимости может выглядеть следующим образом:

1. Анализ первичных данных – данный этап представляет собой анализ первичных полей и их типов, сформированных в результате файловой выгрузки, либо имеющихся в системе реляционных таблиц.

2. Очистка данных – этот этап направлен на первичную обработку данных путем удаления пустых и неинформативных полей, дубликатов, разделения агрегированных и ссылочных данных.

3. Построение множества данных – на этом этапе формируются математические множества, содержащие в себе основные поля сравниваемых структур.

4. Применение алгоритма *Левенштейна* и *расчет сходимости* – на данном этапе сформированная с помощью математических множеств структура проверяется на сходимость еще раз, но уже с использованием алгоритма Левенштейна.

Показатель сходимости данных в общем случае может быть определен на основе индекса сходства Жаккарда (Tavor et al., 2020) с той лишь разницей, что в базах данных учитываются не все уникальные атрибуты таблицы, а общее их количество в созданном представлении:

$$DC = \frac{m}{n} \times 100 \quad (1)$$

где DC – сходимость данных; m – количество записей с совпадающими значениями по выбранным атрибутам; n – количество полей в общей структуре.

Можно также выразить m и n через отдельные счетчики для каждого атрибута:

$$m = \sum_{k=0}^i \min(a, b), \quad (2)$$

$$n = \sum_{k=0}^i |a - b|, \quad (3)$$

где a и b – счетчики значений выбранного атрибута для каждого источника данных;

Чем больше сходимость данных к единице, тем эффективнее получается итоговая структура, что впоследствии сказывается на масштабировании данных.

Множество данных, может быть построено как программным способом, так и вручную.

Результаты и их обсуждения. Основой для построения множества данных послужили стандартные структуры для хранения бухгалтерских документов из нескольких популярных ERP-систем – SAP (таблица ACDOCA) и 1С (Метаданные объекта «Документ»).

На основе части стандартных полей из данных структур было построено новое множество, представляющее предварительную общую структуру путем поименного сравнения полей с использованием языка программирования Python (рис. 1).

Общую структуру данных можно представить множеством S , а наборы данных 1С и SAP могут быть представлены множествами A и B соответственно, что изображено на рис 1. Тогда можно определить, что набор данных SAP является подмножеством множества S , если каждый элемент множества A является элементом множества S . Аналогично, набор данных 1С, каждый элемент которого является элементом множества B , является подмножеством множества S .

Таким образом, можно записать:

$A \subseteq S$, где A – множество данных 1, S – множество общей структуры;

$B \subseteq S$, где B – множество данных 2, S – множество общей структуры;

Для определения соответствия между множествами А и S можно вычислить коэффициент пересечения множеств А и S (1):

$$A \cap S / S * 100\% . \quad (4)$$

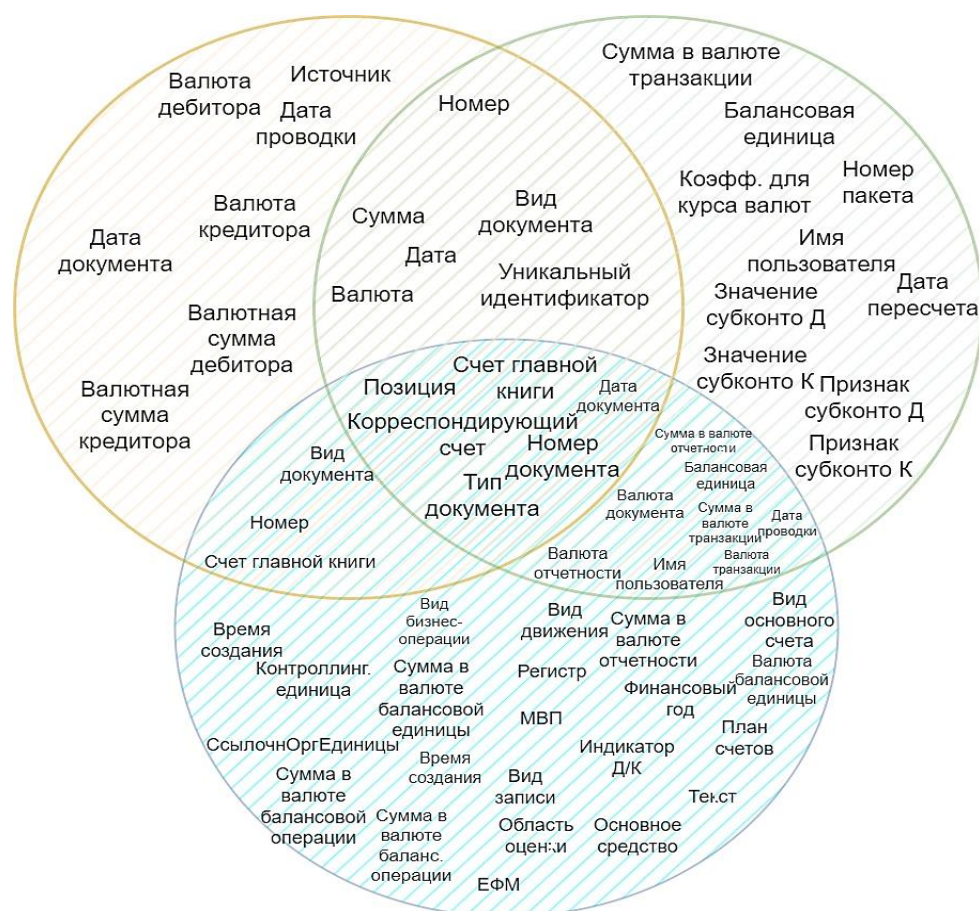


Рисунок 1. Пересечение математических множеств наборов данных 1С и SAP

Примечание – составлено автором

Набор данных А содержит 28 полей, из которых 11 соответствуют полям в общей структуре S.

$$11 / 22 * 100 = 50 \% .$$

Аналогично для определения соответствия между множествами В и S можно вычислить коэффициент пересечения множеств В и S:

$$B \cap S / S * 100\% . \quad (5)$$

Набор данных В содержит 14 полей, из которых 7 соответствуют полям в общей структуре S:

$$7 / 22 * 100 = 31,8 \% .$$

Результаты определения сходимости данных для построенных множеств сведены в табл. 1, где знаком «+» отмечены поля, пересекающиеся с общей структурой.

Таблица 1. Индекс сходимости структур на основе математических множеств

	Поля общей структуры																						DC
Набор данных	10	Балансовая единица	Тип докум.	Дата докум.	Дата пров.	Дата перес.	Козф. для к	Имя пользов.	Валюта док.	Номер пак.	Позиция	Счет г.к.	Приз. суб. д	Знач. суб. д	Кор. счет	Приз. суб. к	Знач. суб. к	Сум. в вал. т	Сум. в вал. б	Сум. в вал. о	Уник. идент.	Номер	
1С	+										+	+			+					+	+	+	0,5
SAP	+	+	+	+	+			+			+	+			+			+				+	0,31
Примечание – составлено автором																							

После расчета сходимости данных для математических множеств можно улучшить результат оценки, применив алгоритм Левенштейна (Карахтанов, 2010), основанный на применении расчета минимальных расстояний до ближайшего поля, связанного с исходным одним семантическим смыслом.

Алгоритм Левенштейна определяет минимальное количество операций вставок, удалений и замены символов, необходимых для превращения одной строки в другую.

Алгоритм может быть обобщен для сравнения нескольких наборов данных путем нахождения минимального редакционного расстояния между каждой парой наборов.

Матрица, создаваемая в результате работы алгоритма Левенштейна, является двумерным массивом размерностью $(m+1)$ на $(n+1)$, где m и n - длины сравниваемых строк или наборов данных.

Чем меньше расстояние Левенштейна для пары полей, тем более вероятно их совпадение (рис. 2).

Теперь необходимо пересчитать оценку сходимости, с учетом найденных полей. В итоге для набора данных SAP число полей, которые соответствуют полям из общей структуры, увеличилось с 11 до 14, что составляет (1):

$$14 / 22 * 100 = 63,6 \, \%.$$

Набор данных 1С теперь имеет 10 полей, что на 3 единицы больше, чем до применения алгоритма (2):

$$10 / 22 * 100 = 45,4 \, \%.$$

Применив алгоритм Левенштейна к имеющемуся набору данных, результаты расчета показали рост показателей для наборов 1С – 0,13 и SAP – 0,14 соответственно.

Стоит отметить, что в работе алгоритма иногда появляются корреляции в виде минимальных расстояний Левенштейна для полей, не связанных семантическим смыслом, однако процент нахождения таких полей сводится к уровню погрешности (Yujian et al., 2007; Lindsay et al., 1986; Veiga et al., 2002; Ankorion, 2005; Srikanth et al., 2012).

Это связано с тем, что существуют словосочетания с одинаковой парой слов, в которых заложен один и тот же смысл, меняющийся в результате его связи с другим словом.

Примером могут являться строки «номер пакета» и «номер документа», в которых слово номер несет в себе тот же смысл, который меняется при появлении пары. В таких случаях требуется ручная корректировка.

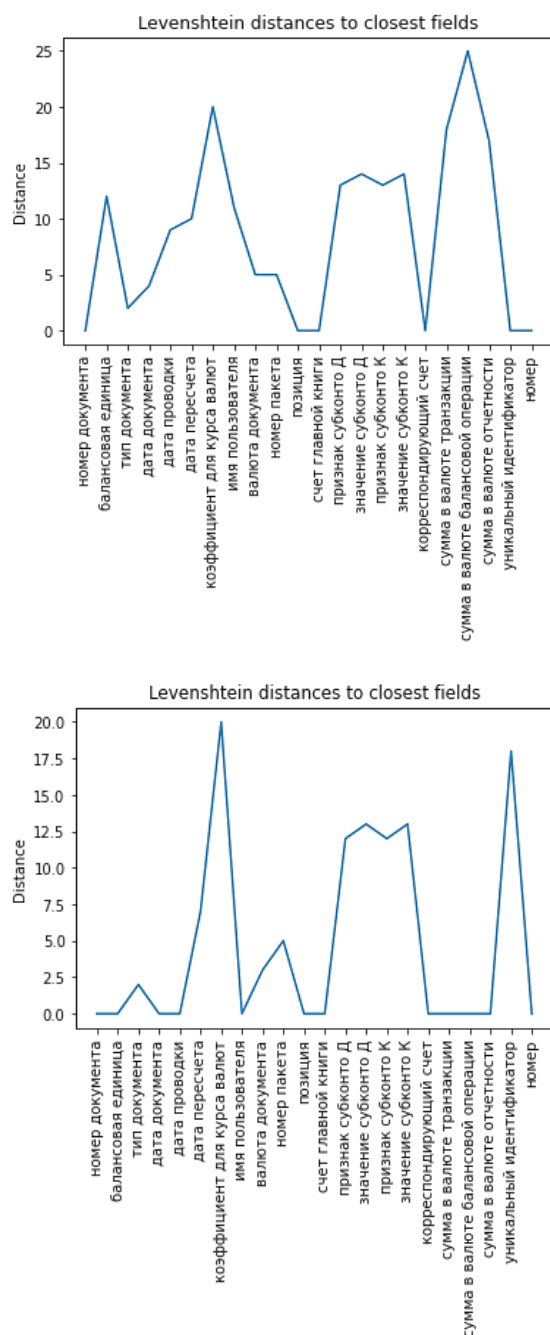


Рисунок 2. Расстояние Левенштейна до ближайших совпадений для структуры полей 1С и SAP
Примечание – составлено автором

Вывод: Процесс создания общей структуры, будь то хранение извлеченных данных из различных источников, или же временное хранилище перед загрузкой данных в целевую систему, является обязательным звеном в любой концепции репликации данных. Представлена модель изучения первичных структур ERP-систем в целях создания общей структуры для хранения извлеченных данных с применением полу-автоматизированного метода математических множеств и программного алгоритма Левенштейна,

позволяющего улучшить результат метрики согласованности данных. По результатам, полученным в данной работе, использование алгоритма Левенштейна позволяет добиться более точных результатов сходимости наборов данных. Таким образом, использование математических множеств и алгоритма Левенштейна для расчета показателя сходимости полей нескольких структур на основе оценки сходимости позволяет создавать более точные структуры под конкретные задачи пользователей и улучшить показатель сходимости данных из нескольких наборов.

Список литературы

- Рыбанов А. А. (2019). Метрики разнообразия типов данных в физической схеме базы данных MySQL // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – № 4 (251). – С. 87-90.
- Hedge, T. (1993). Key Concepts in ELT: Fluency and Project // ELT Journal. – V 3, – P. 275-277, <http://dx.doi.org/10.1093/elt/47.3.275>
- Pishghadam, R. (2011). Introducing applied ELT as a new paradigm // Iranian EFL Journal. – V. 7. – P. 8-14.
- Piattini M., Calero C., Genero M. (2001). Table oriented metrics for relational Databases // Software Quality Journal. № 9 (2), 79–97, DOI:10.1023/A:1016670717863
- Lin Y., Kemme B., et al. (2005). Middleware based data replication providing snapshot isolation // Proceedings of the 2005 ACM SIGMOD international conference on Management of data, 419-430. <https://doi.org/10.1145/1066157.1066205>
- Emmanuel Cecchet, George Candea, and Anastasia Ailamaki. (2008). Middleware-based database replication: the gaps between theory and practice. In Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD international conference on Management of data (SIGMOD '08). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 739–752. <https://doi.org/10.1145/1376616.1376691>
- Рыбанов А.А. (2020). Оценка показателей разнообразия типов данных в физических схемах баз данных // Cloud of science. – Т. 7. – № 3. – С. 517-526
- Moshayed A., Kramer T., et al. (2019). A combined semantic search and machine learning approach for address entity resolution. – EasyChair. – № 832.
- Anju P. R., Deepika M. P. (2016). Removal of Duplicates and Similarity Checking Using Bi-Gram Approach with Jaccard Index in Cloud Data Storage //International Journal of Computer Science and Information Security. – Т. 14. – № 9. – P. 62.
- Tavor Z. Baharav, Govinda M. Kamath, David N. Tse, Ilan Shomorony. (2020). Spectral Jaccard Similarity: A New Approach to Estimating Pairwise Sequence Alignments. – Volume 1. – Issue 6.
- Караханов Д.С. (2010). Программная реализация алгоритма Левенштейна для устранения опечаток в записях баз данных // Молодой ученый. – № 8-1. – 158-162 стр.
- Yujian L., Bo L. (2007). A normalized Levenshtein distance metric //IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – Т. 29. – №. 6, 1091-1095.
- Lindsay B. et al. (1986). A snapshot differential refresh algorithm //Proceedings of the 1986 ACM SIGMOD international conference on Management of data, 53-60. <https://doi.org/10.1145/16894.16860>
- Veiga L., Ferreira P. (2002). Incremental replication for mobility support in OBIWAN //Proceedings 22nd International Conference on Distributed Computing Systems. IEEE, 249-256.
- Ankorion I. (2005). Change data capture efficient ETL for real-time bi //Information Management. – Т. 15. – №. 1. – P. 36.
- Srikanth K., Murthy N., Anitha J. (2012). Data Warehousing Concept Using ETL Process For SCD Type-1 // International Journal of Computer Science & Applications (TIJCSA). – Т. 1. – № 10.

Information about authors

Zhomartkyzy Gulnaz – PhD doctor, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mai: gzhomartkyzy@edu.ektu.kz, ORCID:0000-0003-1465-3451, +77055073381

Pavlov Konstantin Andreyevich – master of technical sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mai: pavlov.kanstantin@gmail.com, + 77479751547

Bazarova Madina Zhomartovna – PhD doctor, S. Amanzholova East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: madina9959843@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2580-6580, +77055032529

ИНФОРМАТИКА
ИНФОРМАТИКА
COMPUTER SCIENCE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_131
MFTAA 20.53.19

Н.М. Казиева¹, Р.М. Оспанов¹, Д.Ю. Зернов², А.К. Калиев³

¹«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті» КеАҚ, Астана қ., Қазақстан

E-mail: kaziyevanm@gmail.com*

E-mail: ospanovrm@gmail.com

²«ҰК «Қазақстан Ғарыш Сапары» АҚ, Астана қ., Қазақстан

E-mail: d.zernov@gharysh.kz

³Group 42 Holding Ltd, Әбу Даби, Біріккен Араб Әмірліктері

E-mail: kaliyev.arman@yandex.kz

ТАРАТЫЛҒАН ТІЗІЛІМ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН ГИБРИДТІ БИОМЕТРИЯЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРДІ ЖОБАЛАУДЫҢ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІ

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ГИБРИДНЫХ БИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ, НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ РАСПРЕДЕЛЕННОГО РЕЕСТРА

MODERN APPROACHES TO THE DESIGN OF HYBRID BIOMETRIC SYSTEMS BASED ON DISTRIBUTED REGISTRY TECHNOLOGIES

Аңдатпа. Биометриялық технологияларды таралған реестр технологияларымен, атап айтқанда блокчейн технологиясымен интеграциялау саласындағы зерттеулер қазіргі заманғы гибридік биометриялық жүйелерді жобалау кезінде қауіпсіздік, құпиялылық және функционалдық үйлесімділікті арттыру жолдарын іздеуге бағытталған. Биометрия және блокчейн технологиялары бір-бірінен тәуелсіз өз артықшылықтары мен әлеуетіне ие. Олардың интеграциясы бұл артықшылықтарды өзара тиімді пайдалану мүмкіндігін береді. Бұл мақала биометрия және блокчейн технологияларын интеграциялаудың әртүрлі аспектілеріне арналған. Блокчейнде идентификация мен қолжетімділікті басқару деңгейінде биометриялық жүйелерді пайдалану мәселесі, әсіресе, биометриялық цифрлық қолтаңбаларды өзірлеу және пайдалану мәселесі қарастырылады. Сондай-ақ, блокчейннің биометриялық деректерді басқаруда, атап айтқанда, блокчейнде биометриялық шаблондарды қауіпсіз сақтау мәселесі қарастырылады.

Түйін сөздер: Биометрия, блокчейн, криптография, сандық қолтаңба.

Аннотация. Исследования в области интеграции биометрических технологий с технологиями распределенного реестра, в частности с технологией блокчейн, направлены на поиск путей повышения безопасности, конфиденциальности и функциональной совместимости при проектировании современных гибридных биометрических систем. Технологии биометрии и блокчейна независимо друг от друга имеют свои преимущества и потенциал. Их интеграция позволяет взаимовыгодно эти преимущества использовать. Данная статья посвящена различным аспектам интеграции технологий биометрии и блокчейна. Рассматривается вопрос использования биометрических систем на уровне управления идентификацией и доступом в блокчейне, в особенности, вопрос разработки и использования биометрических цифровых подписей. Также рассматривается применение блокчейна в управлении биометрическими данными, в частности, безопасное хранение биометрических шаблонов в блокчейне.

Ключевые слова: Биометрия, блокчейн, криптография, цифровая подпись.

Abstract. Research in the field of integrating biometric technologies with distributed ledger technologies, particularly with blockchain technology, aims to find ways to enhance security, privacy, and functional compatibility in the design of modern hybrid biometric systems. Biometric and blockchain technologies each have their own advantages and potential independently of each other. Their integration allows for the mutually beneficial use of these advantages. This article is dedicated to various aspects of the integration of biometric and blockchain technologies. It discusses the use of biometric systems at the

level of identity management and access control in blockchain, especially the development and use of biometric digital signatures. It also examines the application of blockchain in managing biometric data, particularly the secure storage of biometric templates in blockchain

Keywords: *Biometrics, blockchain, cryptography, digital signature.*

Kipicne. Биометриялық технологияларды, атап айтқанда, блокчейн технологиясымен біріктіру саласындағы зерттеулер заманауи гибриді биометриялық жүйелерді жобалау кезінде қауіпсіздікті, конфиденциалдылықты және функционалдық үйлесімділікті арттыру жолдарын іздеуге бағытталған. Биометрия және блокчейн технологиялары өз алдына артықшылықтары мен потенциалына ие. Оларды біріктіру осы артықшылықтарды өзара тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Блокчейн, бір жағынан, биометрия жүйелеріне тұрақтылық, есеп берушілік, қолжетімділік, әмбебап қолжетімділік сияқты қасиеттерді қамтамасыз ете алады. Бұл қасиеттер биометриядағы басқа қолданбалармен қатар, биометриялық үлгілерді қорғау және биометриялық жүйелерде конфиденциалдылықты қамтамасыз ету үшін өте пайдалы болуы мүмкін. Екінші жағынан, биометрия блокчейнге әртүрлі жолдармен, мысалы, блокчейндегі ағымдағы таралған сандық аутентификация және идентификация схемаларын жақсарту арқылы көмектесе алады (Delgado-Mohatar, et al., 2020; Ghafourian, M., 2023).

Бұл мақала биометрия және блокчейн технологияларын интеграциялаудың әртүрлі аспектілеріне арналған. Біріншіден, биометриялық жүйелерді блокчейндегі идентификациялау және кіруді басқару деңгейінде пайдалану мәселесі, атап айтқанда, биометриялық сандық қолтаңбаларды әзірлеу және пайдалану мәселесі қарастырылады. Екіншіден, блокчейннің биометриялық деректерді басқарудағы қолданылуы, атап айтқанда, биометриялық үлгілерді блокчейнде қауіпсіз сақтау қарастырылады. Үшіншіден, гибриді биометриялық сандық қолтаңбаның жаңа схемасы ұсынылады.

Одан әрі мақала келесі бөлімдерден тұрады. Бірінші тармақта таралған реестр технологияларының архитектурасы қарастырылады. Екінші тармақ жалпы биометриялық жүйелерді сипаттауға арналған. Келесі тармақтарда, тиісінше, блокчейнді биометрияда және биометрияны блокчейнде қолдану мәселелері қарастырылады. Одан әрі келесі тармақта ұсынылған жаңа гибриді биометриялық сандық қолтаңба схемасы қарастырылады.

Таратылған тізілім технологиясының архитектурасы. Таратылған тізілім технологиясының анықтамалық архитектурасы әдетте келесі компоненттерді қамтиды (ITU-T Focus Group on Application of Distributed Ledger Technology (FG DLT), 2019; International Organization for Standardization. 2022).

Желілік деңгей. Бұл желідегі тораптар арасында байланыс пен консенсусты қолдайтын негізгі инфрақұрылым. Осы деңгейде қолданылатын хаттамалар мен алгоритмдер желіні құру және қолдау көрсету, сондай-ақ транзакцияларды дәйекті және тиімді тарату мен жазуды қамтамасыз ету үшін арналған. Ол тең-теңімен желі хаттамалары, консенсус алгоритмдері және желілік топологияларды қамтиды. Тең-теңімен желі хаттамалары (P2P) желідегі тораптар арасында байланыстарды орнату және қолдау үшін қолданылады, бұл оларға деректермен алмасуға мүмкіндік береді. Бұл хаттамалар топтағы басқа тораптармен тиімді ақпарат алмасуға мүмкіндік беретін кеңейтілген және көпдресатты механизмдерді қамтуы мүмкін. Консенсус алгоритмдері желідегі барлық тораптарда реестрдің тұтастығы мен келісімділігін қамтамасыз ету үшін қолданылады. Бұл алгоритмдер реестрде транзакцияларды тексеру және жазу механизмін қамтамасыз етеді және жұмыс дәлелі, үлес дәлелі және басқа механизмдерді қамтуы мүмкін. Желілік топологиялар блокчейн жүйесінің өнімділігі мен масштабталуына елеулі әсер етуі мүмкін желінің құрылымын білдіреді. Желілік топологиялардың мысалдары толық байланысқан,

жартылай байланысқан және иерархиялық құрылымдарды қамтиды. Жалпы, желілік деңгей басқа деңгейлердің негізін құрайды, бұл технологиялардың архитектурасының тиімді және қауіпсіз жұмыс істеуін қамтамасыз етеді.

Тізілім деңгейі. Бұл тізілімнің күйін қолдайтын және желіде жазылған транзакцияларды және деректерді сақтайтын деңгей. Бұл деңгей транзакцияларды және желідегі деректерді жазу мен бақылау үшін қолданылатын деректер моделін, деректер құрылымын және сақтау механизмін қамтиды. Бұл дәстүрлі реляциялық дерекқор, NoSQL дерекқорлары немесе IPFS сияқты таралған файлдық жүйелер болуы мүмкін. Бұл деңгей сонымен қатар деректерге қол жеткізу және оларды басқару функцияларын қамтиды, бұл реестрдегі деректерді сақтау, алу және манипуляциялауға мүмкіндік береді. Тізілім деңгейі желідегі барлық транзакциялар мен деректердің өзгермейтін жазбасын қолдауға жауап береді, бұл ашықтық пен көрінуді қамтамасыз етеді. Бұл сонымен қатар реестрді бірнеше торапта сақтау арқылы желіні орталықтандыруға мүмкіндік береді, яғни бір орталықтандырылған жерде емес. Бұл маңызды деңгей, себебі ол желінің барлық транзакциялар мен деректердің қауіпсіз және ашық жазбасын қолдауға мүмкіндік береді, сонымен қатар желінің децентрализовануына мүмкіндік береді.

Консенсус деңгейі. Бұл желідегі тораптар арасында консенсусты басқаруға және тізілімнің күйінің барлық тораптармен келісілгенін қамтамасыз етуге арналған деңгей. Бұл деңгей консенсусты орнату және қолдау үшін қолданылатын консенсус хаттамаларын қамтиды, мысалы, жұмыс дәлелі (PoW), үлес дәлелі (PoS), византийская қателікке төзімділік (BFT) және басқалары. Бұл хаттамалар желінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін, сондай-ақ реестрдің дәлдігін және рұқсатсыз қол жеткізуден қорғауды қамтамасыз ету үшін қолданылады. Консенсус деңгейі транзакцияларды тексеруге, оларды блоктарға қосуға және желідегі барлық тораптардың реестрдің күйін келісуін қамтамасыз етуге жауап береді. Бұл сонымен қатар желінің зиянкестерден қорғалғанын қамтамасыз етеді, жаңа блоктардың тізбекке тек жеткілікті тораптар блоктың мазмұнымен келісетін кезде ғана қосылуын талап етеді. Бұл маңызды деңгей, себебі ол желінің реестрдің күйі бойынша консенсусты қамтамасыз етуіне мүмкіндік береді, желінің қауіпсіздігін және шабуылдарға төзімділігін қамтамасыз етеді.

Ақылды келісімшарттар деңгейі. Бұл желідегі ақылды келісімшарттардың орындалуын басқаратын деңгей. Бұл деңгейге, мысалы, ақылды келісімшарттар жасау үшін қолданылатын Solidity немесе Vyper сияқты бағдарламалау тілдері, сондай-ақ оларды орындау үшін қолданылатын жұмыс уақыты мен виртуалды машиналар кіреді. Ол сондай-ақ ақылды келісімшарттарды құрастыру, сынау және орналастыру үшін қолданылатын Truffle, Embark немесе Geth сияқты құралдар мен даму орталарын қамтиды. Ақылды келісімшарт деңгейі белгілі бір шарттар орындалған кезде келісімшарт талаптарын автоматты түрде орындауға жауап береді. Бұл мүмкіндік бизнес-процестерді автоматтандыруға және орталықтандырылмаған қосымшаларды (gapps) құруға мүмкіндік береді. Бұл маңызды деңгей, өйткені ол желідегі транзакциялар мен өзара әрекеттесулердің әртүрлі түрлерін автоматтандыру және оңтайландыру үшін пайдалануға болатын сенімсіз және дербес жүйелерді құруға мүмкіндік береді.

Қолданбалы деңгей. Бұл пайдаланушы мен қолданбаның желімен өзара әрекеттесуі үшін интерфейс пен функционалдылықты қамтамасыз ететін деңгей. Оған веб-қосымшалар мен мобильді қосымшалар, сондай-ақ желімен өзара әрекеттесу үшін жасалған басқа пайдаланушы интерфейстері кіреді. Ол сондай-ақ желіге кіру үшін пайдаланылатын API, кітапханалар және SDK, сондай-ақ кітап сұраулары, смарт келісімшарттарды орналастыру және орындау, шот туралы ақпаратқа қол жеткізу сияқты желі ұсынатын қызметтерді қамтиды. API интерфейстері сыртқы қолданбаларға DLT желісінің функционалдығын қамтамасыз ету үшін пайдаланылады. Бұған тізіліммен өзара

әрекеттесу үшін HTTP пайдаланатын RESTful API, сондай-ақ gRPC немесе GraphQL сияқты басқа API стандарттары кіруі мүмкін. SDK және кітапханалар блокчейн желісімен өзара әрекеттесетін қосымшаларды құру процесін жеңілдету үшін қолданылады. Бұл Java, Python немесе JavaScript сияқты танымал бағдарламалау тілдеріне арналған кітапханалар, сондай-ақ iOS немесе Android сияқты платформаларға арналған SDK болуы мүмкін. Бұл деңгей, әдетте, даму орталарын, ақылды келісімшарттарды әзірлеуді, қосымшаларды орналастыруды, әмияндарды, шолғыштарды, бақылау тақталарын, интеграцияланған даму ортасын (IDE) қамтиды.

Сәйкестендіру және қол жеткізуді басқару деңгейі (IAM). Бұл желідегі мүшелерді сәйкестендіруді басқаруға және желіге кіруді бақылауға жауап беретін деңгей. Ол пайдаланушы куәліктерін жасау, басқару және тексеру тетіктерін, сондай-ақ тізілімге және ақылды келісімшарттарға кіруді басқару элементтерін қамтиды. Оған жеке куәлік провайдерлері (IdP), ашық кілт инфрақұрылымы (PKI), рөлге негізделген қол жеткізуді басқару (RBAC) және желіге кіру үшін пайдаланушылар мен қолданбаларды аутентификациялау және авторизациялау үшін пайдаланылатын өзін-өзі сәйкестендіру шешімдері (SSI) сияқты компоненттер кіреді. IDP блокчейн желісіндегі мүшелерді аутентификациялау үшін қолданылады. Бұл дәстүрлі пайдаланушы аты мен құпия сөз аутентификациясын, сондай-ақ көп факторлы аутентификация (MFA) және биометрия сияқты жетілдірілген әдістерді қамтуы мүмкін. PKI блокчейн желісіндегі қатысушылардың сандық сертификаттары мен ашық және жеке кілттерін басқару үшін қолданылады. Бұған цифрлық сертификаттарды беретін және қайтарып алатын сертификаттау орталықтары (ОЖ), сондай-ақ онлайн сертификат мәртебесі хаттамасы (OCSP) және сертификаттарды қайтарып алу тізімі (CRL) сияқты сертификаттарды басқару хаттамалары кіруі мүмкін. RBAC блокчейн желісіндегі мүшелердің рөлдері мен рұқсаттарына негізделген тізілімге және ақылды келісімшарттарға қол жеткізуді басқару үшін қолданылады. Бұл қол жеткізу саясаттарын анықтау және қолдану үшін қол жеткізуді басқару (ACL) және атрибутқа негізделген қол жеткізуді басқару (ABAC) тізімдерін пайдалануды қамтуы мүмкін. SSI-адамдарға жеке сәйкестендіру ақпаратын толық бақылауға мүмкіндік беретін орталықтандырылмаған сәйкестендіруді басқару жүйесі. Блокчейн жүйесіндегі IAM деңгейінің негізгі ерекшеліктерінің бірі-авторизацияланған пайдаланушылар үшін тізілімге және ақылды келісімшарттарға оңай қол жеткізуді қамтамасыз ете отырып, қауіпсіздік пен құпиялылықтың жоғары деңгейін қамтамасыз ету мүмкіндігі. Бұл көп факторлы аутентификация, биометриялық аутентификация, шифрлау және қауіпсіз деректер алмасу сияқты озық қауіпсіздік және криптографиялық технологияларды пайдалануды талап етеді.

Жалпы типтегі биометриялық жүйелер. Биометриялық жүйенің мақсаты – олардың әртүрлі биологиялық және мінез-құлық сипаттамаларына, яғни дене бөліктерінің физикалық қасиеттеріне, денеде жүретін физиологиялық процестерге, дене шығаратын мінез-құлық процестеріне және олардың комбинацияларына негізделген адамдарды автоматты түрде тану (Стандартинформ. 2018. ГОСТ ИСО/МЭК 19794-1-2015). Адамның биологиялық сипаттамаларының мысалдары: папиллярлық сызықтардың құрылымы (саусақ ізі), көздің торлы қабығының суреті, ирис құрылымы, бет геометриясы, алақан пішіні, құлақ пішіні, дене иісі, жүрек соғысы, қолдардағы тамыр үлгісі, ДНҚ құрылымы. Мінез-құлық сипаттамаларының мысалдары: жүру, дауыс, қолжазба, пернетақта қолжазбасы.

Биометриялық тану биометриялық жүйенің келесі функцияларын орындау арқылы жүзеге асырылады: биометриялық тіркеу, тексеру және сәйкестендіру.

Адаммен өзара әрекеттесу нәтижесінде биометриялық тіркеу кезінде биометриялық жүйе сенсорлардың (биометриялық сканерлердің) көмегімен кескін

немесе сигнал түрінде биометриялық сипаттамалардың деректерін алады және тіркейді. Содан кейін тіркелген деректер олардағы кейбір тән биометриялық белгілерді (қайталанатын және айрықша көрсеткіштер) анықтау және кейіннен бөліп көрсету мақсатында өңделеді. Өңделген деректер әрі қарай пайдалануға жарамдылығы тексеріледі және тексеруден өтпеген жағдайда деректерді қайта жинау, тіркеу және өңдеу қажет болуы мүмкін. Қажет болса, тіркелген деректердің сапасын жақсарту жүзеге асырылады. Әрі қарай, өңделген және тексерілген деректер осы адамға арналған биометриялық тіркеудің бақылау үлгісі ретінде сақталады. Сондай-ақ, биометриялық тіркеу кезінде биометриялық тіркеу нәтижесінің одан әрі пайдалану үшін жарамдылығын растау үшін тестілік верификация немесе сәйкестендіру жүргізіледі, ал қанағаттанарлықсыз нәтижелер болған жағдайда биометриялық тіркеуді қайталап көруге рұқсат беріледі.

Тексеру кезінде биометриялық жүйе адаммен өзара әрекеттесу кезінде деректерді алады және тіркейді, содан кейін олар өңделеді және тексеріледі. Әрі қарай үлгінің алынған биометриялық белгілері биометриялық бақылау үлгісімен салыстырылады. Салыстыру нәтижелері бойынша салыстыру нәтижесін бере отырып, адамның деректер жүйесінде болуын растау үшін верификация бойынша шешім қабылданады.

Сәйкестендіру кезінде биометриялық жүйе адаммен өзара әрекеттесу кезінде деректерді алады және тіркейді, содан кейін олар өңделеді және тексеріледі. Содан кейін алынған үлгінің биометриялық белгілерін әр салыстыру үшін салыстыру нәтижесін бере отырып, биометриялық тіркеу дерекқорында сақталған жеке немесе барлық биометриялық бақылау үлгілерімен салыстыру жасалады. Салыстыру нәтижелері бойынша үміткерлердің тізімі жасалады. Кандидаттардың тізімдері негізінде сәйкестендіру бойынша шешім қабылданады.

Жалпы алғанда, биометриялық жүйенің құрылымы келесі компоненттерден тұрады: деректерді жинау ішкі жүйесі, деректерді беру ішкі жүйесі, сигналды өңдеу ішкі жүйесі, деректерді сақтау ішкі жүйесі, деректерді салыстыру ішкі жүйесі, шешім қабылдау ішкі жүйесі, әкімшілік ішкі жүйе, интерфейс.

Деректерді жинаудың ішкі жүйесі сенсорларды (биометриялық сканерлер) қолдана отырып, кескін немесе сигнал түрінде биометриялық сипаттамалардың деректерін алуға және тіркеуге арналған.

Деректердің ішкі жүйесі биометриялық деректерді биометриялық жүйенің әртүрлі ішкі жүйелері арасында биометриялық деректермен алмасудың кейбір стандартты форматында беруге арналған. Сонымен қатар, ақпараттың түпнұсқалығын, тұтастығын және құпиялылығын қамтамасыз ету үшін берілетін деректерге ақпаратты қорғаудың әртүрлі әдістері, соның ішінде қысу және/немесе шифрлау алгоритмдері қолданылуы мүмкін.

Сигналды өңдеудің ішкі жүйесі алынған және тіркелген деректерде анықтауға және кейіннен белгілі бір тән биометриялық белгілерді (қайталанатын және айрықша көрсеткіштер) бөліп көрсетуге арналған. Сондай-ақ, сигналды өңдеудің ішкі жүйесі сапаны бақылауды жүзеге асырады, өңделетін деректерді одан әрі пайдалануға жарамдылығын тексереді және тексеруден өтпеген жағдайда деректерді жинаудың ішкі жүйесіне деректерді басқаруды қайтарады немесе өңдеу параметрлерін өзгертеді. Қажет болса, тіркелген деректердің сапасын жақсарту жүзеге асырылады.

Деректерді сақтаудың ішкі жүйесі биометриялық тіркеу деректерін сақтауға арналған, мүмкін кейбір стандартты биометриялық алмасу форматында. Оның негізгі бөлігі сәйкесінше биометриялық тіркеу дерекқоры болып табылады. Сонымен қатар, белгілі бір деректерді биометриялық сканердің өзінде, кейбір портативті медида (мысалы, смарт-карта), Дербес компьютерде сақтауға болады.

Деректерді салыстыру ішкі жүйесі алынған және тіркелген деректерден оқшауланған биометриялық белгілерді деректерді сақтау ішкі жүйесінде сақталған бір немесе бірнеше биометриялық бақылау үлгілерімен салыстыруға арналған. Ол салыстыру нәтижелерін шешім қабылдаудың ішкі жүйесіне береді. Тексеру кезінде жүйе әр сұрау үшін бір салыстыру нәтижесін береді. Сәйкестендіру кезінде жүйе көптеген салыстыруларды орындайды және әр салыстыру үшін нәтиже береді.

Шешім қабылдаудың ішкі жүйесі верификация немесе сәйкестендіру кезінде қорытынды нәтиже беруге арналған. Ол деректерді салыстыру ішкі жүйесімен алынған салыстыру нәтижелерін пайдаланады. Бұл нәтижелерді бір немесе бірнеше әрекеттен кейін алуға болады.

Ішкі басқару жүйесі биометриялық жүйені жалпы басқаруға арналған. Ол заңнамалық, құқықтық және қоғамдық шектеулер мен талаптарды ескере отырып, биометриялық жүйенің жалпы әдістемесін, мінез-құлқын және қолданылуын басқарады.

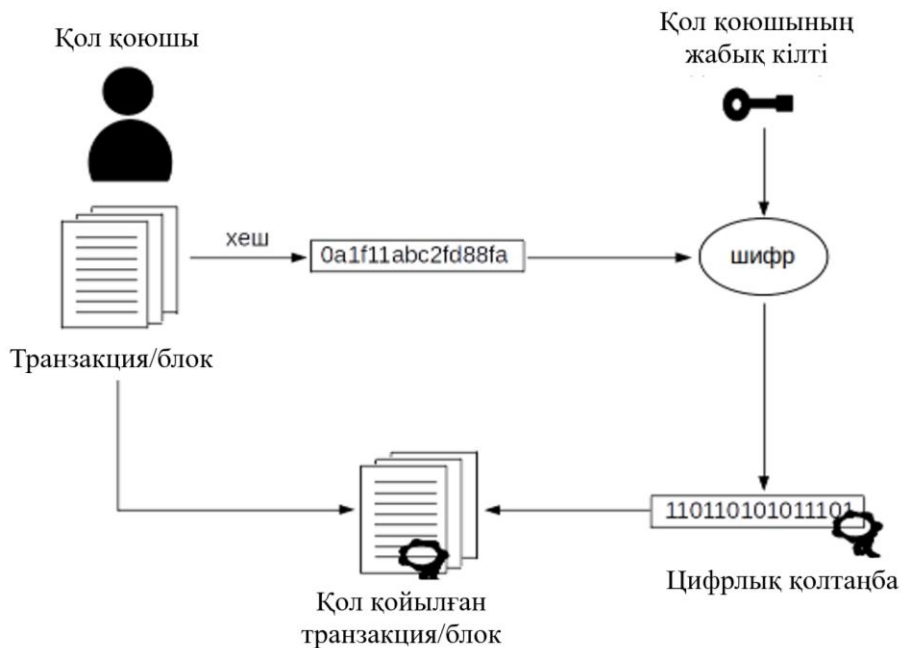
Интерфейс биометриялық жүйенің сыртқы қосымшалармен немесе жүйелермен өзара әрекеттесуіне арналған. Ол мұндай өзара әрекеттесуді қолданбалы бағдарламалық интерфейс, аппараттық интерфейс немесе хаттама интерфейсі арқылы жүзеге асырады.

Блокчейн жүйелерінде биометрияны қолдану. Блокчейндегі биометрияны қолданудың негізгі бағыттарының бірі – сәйкестендіру және қол жеткізуді басқару деңгейінде биометриялық жүйелерді пайдалану. Атап айтқанда, бірқатар артықшылықтары бар биометриялық цифрлық қолтаңбаларды әзірлеу және пайдалану мәселесі өзекті.

Жалпы алғанда, цифрлық қолтаңба схемасы келесі жалпы мақсатты көздейтін алгоритмдердің жиынтығы болып табылады. Кейбір бастапқы алғышарттар орындалған кезде жарамды цифрлық қолтаңба хабарламаны алушыға алынған хабарламаны белгілі жіберуші жасағанына және хабарлама жіберілген кезде өзгертілмегеніне, сондай-ақ жіберуші хабарламаға қол қою фактісінен бас тартпайтынына сенімді болуға мүмкіндік береді. Басқаша айтқанда, цифрлық қолтаңба схемасының мақсаты – хабарламалардың түпнұсқалығын, тұтастығын, сондай-ақ бас тартпауды қамтамасыз ету (Menezes, A., et al., 1997).

Цифрлық қолтаңба схемасы кем дегенде негізгі жұпты қалыптастыру алгоритмін, цифрлық қолтаңбаны қалыптастыру алгоритмін, цифрлық қолтаңбаны тексеру алгоритмін қамтиды. Негізгі жұпты құру алгоритмінің кірістері, мысалы, қауіпсіздік параметрі, кейбір математикалық параметрлер, қолданылатын криптографиялық хэш функциясының сипаттамасы болуы мүмкін ғаламдық ақпарат болып табылады. Алгоритмнің жұмысының нәтижесінде ашық және жеке кілттер жұбы алынады. Цифрлық қолтаңбаны қалыптастыру алгоритмінің кірістері хабарлама, ғаламдық ақпарат, жеке кілт болып табылады. Алгоритмнің жұмысының нәтижесінде қол қойылған хабарлама алынады. Сандық қолтаңбаны тексеру алгоритмінің кірістері ашық кілт, хабарлама және қолтаңба болып табылады. Алгоритмнің жұмысының нәтижесінде қолтаңба, егер ол жарамды болса немесе басқаша қабылданбаса қабылданады.

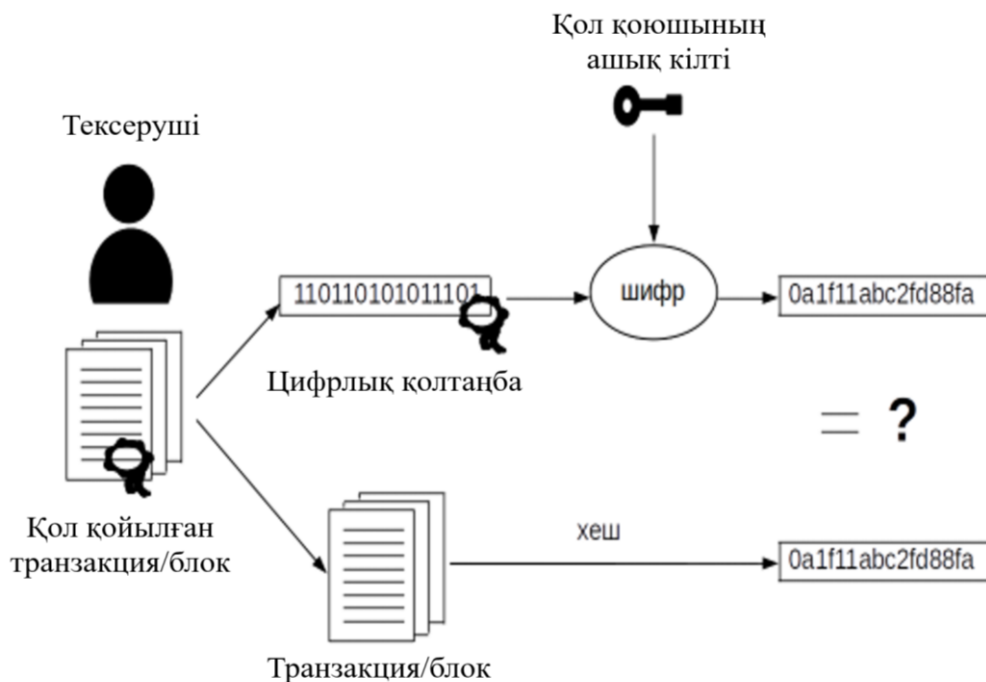
Қол қою схемасы блокчейнде транзакцияға қол қою үшін қолданылады, демек, жіберушінің болжамды аутентификациясы және транзакцияның тұтастығын, сондай-ақ жіберушінің бас тартпауын қамтамасыз ету. Көптеген қолтаңба схемалары блокчейнде тұтастық пен анонимділікті қамтамасыз ету үшін кеңінен қолданылады (Bellaj, B., et al., 2022). Сандық қолтаңба – бұл блокчейнді көпшілік алдында тексерілетін және қол жетімді консенсусқа айналдыратын маңызды криптографиялық примитивтердің бірі. Қолтаңба схемалары барлық дерлік блокчейндерде қолданылады. 1-суретте блокчейн пайдаланушысы (қол қоюшы) өзінің жеке кілтін пайдаланып транзакцияны немесе цифрлық қолтаңба блогын қалай жасайтынының жалпы мысалы келтірілген.



1-сурет. ЭЦҚ арқылы транзакция (блок) құру

Ескерту – автормен құрастырылған немесе (Menezes, A., et al., 1997) негізінде құрастырылған

Сонымен қатар, 2-суретте басқа блокчейн түйіндері (тексерушілер) транзакциядағы немесе блоктағы қолтаңбаның жарамды немесе қол қоюшының ашық кілтін пайдаланбағанын қалай тексеретінін көрсетеді.



2-сурет. Транзакцияның (блоқтың) ЭЦҚ-ны тексеру

Ескерту – автормен құрастырылған немесе (Menezes, A., et al., 1997) негізінде құрастырылған

Блокчейн құпиялылық, анонимділік және байланыстырылмау сияқты қосымша мүмкіндіктерді қамтамасыз ету үшін әртүрлі қол қою схемаларын пайдаланады.

Блокчейндегі дәстүрлі цифрлық қолтаңбалар криптографиялық кілттерге негізделген, олар тиімді болғанымен ұрлануы, жоғалуы немесе бұзылуы мүмкін. Биометриялық цифрлық қолтаңбалар қауіпсіздіктің қосымша деңгейін қосады, себебі олар саусақ ізі немесе бет үлгісі сияқты адамның бірегей физикалық немесе мінез-құлық қасиеттеріне байланысты. Бұл рұқсат етілмеген қол жеткізу және алаяқтық транзакциялар қаупін айтарлықтай төмендетеді (Hassen O, A., et al., 2020; Kaga, Y., et al., 2017).

Биометриялық цифрлық қолтаңбалар аутентификацияның күшті дәлелін береді. Пайдаланушы биометрикасын пайдаланып транзакцияға немесе құжатқа қол қойғанда, бұл олардың жеке басын растап қана қоймайды, сонымен қатар олардан бас тартуға болмайтындығына кепілдік береді. Бұл пайдаланушының транзакцияға қатысуын кейіннен бас тарта алмайтынын білдіреді, бұл биометриялық қолтаңбаны заңды және нормативтік талаптарға сәйкестік үшін құнды етеді.

Құпия сөздер немесе PIN кодтары сияқты дәстүрлі аутентификация әдістерімен салыстырғанда, биометриялық аутентификация пайдаланушылар үшін ыңғайлы. Ол сондай-ақ күрделі құпия сөздерді есте сақтау қиынға соғатын адамдар үшін қолжетімділікті жақсартып алады.

Биометриялық цифрлық қолтаңбаларды жобалау биометриялық деректерден криптографиялық кілттерді генерациялауға негізделген. Негізгі материалдың көзі ретінде биометриялық деректерді пайдаланудың артықшылықтарына биометриялық мүмкіндіктердің бірегейлігі, қайталануы және тұрақты қолжетімділігі, сонымен қатар ыңғайлылық, икемділік, әртүрлі мүмкіндіктердің үйлесімділігі және үнемділігі жатады. Бұл ретте оларды пайдалануда кейбір мәселелер бар екенін ескеру қажет. Биометриялық технологиялар бастапқыда бірінші типтегі қателердің (немесе FAR, жалған қабылдау, жалған мақұлдау) және екінші типтегі қателердің (немесе FRR, жалған қабылдамау, жалған бас тарту) болуын болжайды. Биометриялық ақпаратты дәл және сенімді қайта шығару мүмкін емес және ықтималдықтың біркелкі таралуына бағынбайды. Оның үстіне биометриялық деректер құпия емес және адамның физикалық және эмоционалдық жағдайына байланысты өзгеруі мүмкін.

Биометриялық деректерден криптографиялық кілттерді генерациялау, өз кезегінде, биометриканы кодқа түрлендіру әдістеріне негізделген, олар «Меншікті» анық емес, анық емес биометриялық параметрлердің векторларын анық, біркәнді кілттік (пароль) кодтарға түрлендіруге және жауап беруге қабілетті. Көптеген «Меншікті» кескіндерге жатпайтын кездейсоқ кіріс векторларының әсеріне кездейсоқ шығыс кодтары. «Биометрикадан кодқа» түрлендіргіштер екі түрге бөлінеді: анық емес экстракторлар және «биометрикадан кодқа» нейрондық желі түрлендіргіштері (Казанцев, Е.И., & Иванов, А. И. 2019; Стандартинформ. 2020. ГОСТ Р 52633.0-2006).

Бұлыңғыр экстрактор – бұл өзін-өзі түзететін артық кодтарды пайдалана отырып, кіріс деректеріндегі өзгерістер мен қателерге сенімді бола отырып, шулы немесе сенімсіз шикі биометриялық кіріс деректерінен бір мағыналы криптографиялық кілт кодын жасайтын алгоритм. Бұлыңғыр экстракторлар әдетте екі негізгі құрамдас бөліктен тұрады: тіркеу кезеңі, онда биометриялық деректер жиналады және анықтамалық үлгіні жасау үшін пайдаланылады және биометриялық деректер қайтадан жиналып, анықтамалық үлгімен салыстырылады. криптографиялық кілт (Казанцев, Е.И., & Иванов, А. И. 2019).

Нейрондық желі «биометрика-код» түрлендіргіштері – «Меншікті» кіріс биометриялық параметрлерінің ішінара кездейсоқ векторын біркәнді криптографиялық кілт кодына (ұзын пароль) түрлендіретін және кез келген басқа түрлендіретін кірістер мен шығыстардың үлкен саны бар алдын ала дайындалған жасанды нейрондық желілер. Кездейсоқ

шығыс кодына енгізілген деректердің кездейсоқ векторы (Стандартинформ. 2020. ГОСТ Р 52633.0-2006). Нейрондық желі жаттығу кезінде биометриялық деректерден тиісті мүмкіндіктерді алуды үйренеді және оларды дәйекті көрініске түсіреді.

Биометриялық негізделген цифрлық қолтаңба схемаларының әртүрлі мысалдары бар. Мысалы, (Burnett, A., et al., 2007) жұмысы анық емес экстракторлар негізінде ашық кілтті және сәйкес жабық кілтті және эллиптикалық қисық нүктелер арқылы деректерді көрсету әдісін генерациялау үшін биометриялық деректерді пайдаланатын цифрлық қолтаңба схемасын сипаттайды (Janbandhu, P.K., & Siyal, M.Y. 2001). RSA және DSA бар және кеңінен қолданылатын екі цифрлық қолтаңба алгоритмдерін пайдалана отырып, шатыраш қабық көз тануға негізделген екі биометриялық қолтаңба схемасын ұсынады. RSA және DSA алгоритмдері жеке кілтті жасау үшін 512 байт шатыраш қабық көз биометриялық үлгісімен пайдаланылады. (Kwon, T., & Lee, J. 2004) инфрақұрылымын өзгертпей RSA сияқты бар криптографиялық алгоритмді пайдаланып тексеруге арналған биометриялық цифрлық қолтаңба схемасын ұсынады. (Takahashi, K., et al., 2019) мақалада жеке кілт ретінде биометриялық деректер сияқты шулы жолды пайдаланатын, бірақ қолтаңбаны генерациялау үшін пайдаланушыға арналған көмекші деректерді (сонымен қатар анық емес экстракторлар контекстінде көмекші жол деп те аталады) қажет етпейтін цифрлық қолтаңба схемасын ұсынады. Сондай-ақ мақалада биометриялық деректердің өзін жалпы биометриялық инфрақұрылым (PBI) деп аталатын криптографиялық кілт ретінде пайдаланатын биометриялық негізделген PKI енгізу үшін анық емес қолтаңба схемаларын қалай пайдалануға болатыны талқыланады. (Shan, X., You, L., & Hu, G. 2021)-да эллиптикалық қисық топтарға негізделген биометриялық деректерді пайдалана отырып, цифрлық қолтаңба үшін BioFIBS және Bio-IBS екі дизайны әзірленген. Жоба (Nagpal, R., & Nagpal, S. 2002) биометриялық деректер негізінде цифрлық қолтаңба үшін кілттерді генерациялау схемасын құрудың тұжырымдамалық негізін ұсынады. Бұл схемада жеке кілт құжатқа немесе жазбаға қол қою қажет болған сайын жасалады. Дегенмен, нақты алгоритмдер анықталмаған. (slam, S. H., Das, A. K., & Khan, M. K. 2016) мақалада анық емес экстракторды және екі сызқты эллиптикалық қисық жұптастыруды пайдалана отырып, биометриялық негізделген сандық көп қолтаңбалы схеманы (BIO-IDMS) ұсынады.

Биометриялық жүйелерде блокчейнді қолдану. Бөлінген кітап технологияларын, атап айтқанда блокчейнді қолдану биометриялық деректерді басқару және құпия жеке ақпаратты өңдеудің қауіпсіз және ашық әдісін қамтамасыз ету, биометриялық деректерді сақтау және аутентификациямен байланысты кейбір мәселелерді шешу болып табылады. Биометриялық жүйелер бірқатар шабуылдарға осал екені белгілі (Delgado-Mohatar, et al., 2020) және биометриядағы блокчейннің маңызды қолданбаларының бірі биометриялық үлгілерді қорғау болып табылады. Биометриялық үлгілерді блокчейнде сақтау дерекқордағы үлгілерді өзгерту және дерекқор мен деректерді жинау ішкі жүйесі арасындағы деректерді ұстап алу арқылы шабуылдардың алдын алуға мүмкіндік береді. Бірақ биометриялық деректер иелерінің құпиялылығын барынша қорғау және биометриялық үлгілердің қайтымсыздығы, байланыссыздығы және жаңартылу мүмкіндігінің қажетті қасиеттеріне қол жеткізу үшін биометриялық үлгілерді қорғаудың күрделі схемалары қолданылады. Биометриялық үлгілерді қорғау әдістерін (Delgado-Mohatar, et al., 2020) ретінде жіктеуге болады:

1) жойылатын биометрия (Mohamed, S., et al., 2017) (мысалы, кездейсоқ проекция, биоэшинг, биоконволюция, қайтымсыз трансформация);

2) биометриялық криптожүйелер (Patel, V.M., et al., 2015) (бұлыңғыр сақтау, анық емес міндеттеме, қауіпсіз эскиздер);

3) шифрланған түрдегі биометрия (гомоморфты шифрлау, бұрмаланған схемалар).

Биометриялық жүйелерде блокчейнді қолдану бірқатар артықшылықтарға ие. Биометриялық деректер өте сезімтал және қауіпсіз сақтауды қажет етеді. Блокчейннің өзгермейтіндігі деректер жазылғаннан кейін оны із қалдырмай өзгертуге болмайтындығына кепілдік береді. Бұл биометриялық жазбаларға рұқсатсыз араласудың немесе манипуляцияның алдын алады. Дәстүрлі орталықтандырылған дерекқорлар бір ғана сәтсіздіктер мен ымыраға келу нүктелеріне осал. Блокчейн желісінде биометриялық деректерді сақтау деректерді бірнеше түйіндер бойынша таратады, бұл барлық деректерді бұзатын бір бұзу қаупін азайтады. Блокчейн пайдаланушыларға биометриялық деректерін көбірек бақылауға мүмкіндік береді. Қажет болса, пайдаланушылар толық биометриялық профилін көрсетпестен белгілі бір атрибуттарға уақытша рұқсат бере алады. Блокчейндегі ақылды келісімшарттар келісімді басқаруды жеңілдетеді. Пайдаланушылар өздерінің биометриялық деректеріне кім және қандай жағдайларда қол жеткізе алатынын басқара алады, бұл дұрыс құпиялылықты басқаруды қамтамасыз етеді. Блокчейн аудитті және ашықтықты қамтамасыз етеді: блокчейндегі әрбір транзакция жазылады және бақыланады. Бұл пайдаланушыларға деректеріне кім және қашан қол жеткізгенін бақылауға мүмкіндік беретін аудит мақсатында пайдалы болуы мүмкін. Блокчейн әртүрлі платформалар мен ұйымдар арасында биометриялық деректерді қауіпсіз алмасу үшін стандартталған хаттаманы қамтамасыз ете алады, өзара әрекеттесуді жақсартады. Қауіпсіз көп факторлы аутентификация процесін жасау үшін блокчейн негізіндегі биометриялық аутентификацияны құпия сөздер немесе таңбалауыштар сияқты аутентификацияның басқа әдістерімен біріктіруге болады. Блокчейн орталықтандырылған органдарды қажет етпей-ақ қауіпсіз трансшекаралық аутентификацияны және жеке басын растауды жеңілдетеді. Блокчейнде сақталған биометриялық деректер технологияның криптографиялық сипатына байланысты жеке басын куәландыратын ұрлыққа және алаяқтыққа өте төзімді. Банктер сияқты жеке басын растауы қажет ұйымдар биометриялық деректердің түпнұсқалығын тексеру және тұтынушыны қосу процестерін жеңілдету үшін блокчейнді пайдалана алады.

Сонымен бірге, биометрияға блокчейнді қолдану кезінде ескеру қажет бірқатар мәселелер бар. Блокчейндегі үлкен көлемдегі биометриялық деректерді сақтау және басқару масштабтауға әсер етуі мүмкін. Офлайн сақтау немесе бүйірлік тізбектер сияқты шешімдер қажет болуы мүмкін. Блокчейн құпиялылықты жақсартса да, құпия биометриялық ақпаратты жалпыға қолжетімді немесе реттелмейтін блокчейнде сақтауға байланысты ықтимал құпиялылық мәселелерін шешу маңызды. Құпиялылық пен құпиялылық ережелерін сақтау, әсіресе денсаулық сақтау және қаржы салаларында, биометриялық деректермен жұмыс істеу кезінде өте маңызды. Блокчейн желісін құру және қолдау бастапқы шығындар мен техникалық инфрақұрылым талаптарын қамтуы мүмкін.

Гибридті биометриялық цифрлық қолтаңба схемасының мысалы. Жаңа гибридті биометриялық цифрлық қолтаңба схемасын қарастырамыз, ол XMSS (eXtended Merkle Signature Scheme) схемасына негізделген, қазіргі заманғы кванттық тұрақты схема, Меркл ағаштарын және WOTS+ (Winternitz One-Time Signature) бір реттік қолтаңбаларын қолданады (Buchmann, J., Dahmen, E., & Huelsing, A. (2011)). Биометрияны кілттерді генерациялау процесіне интеграциялау, сондай-ақ блокчейн технологиясымен интеграциялау ұсынылады. Кілт жұбын қалыптастыру алгоритмі (құпия (жабық) кілт SK және ашық кілт PK генерациясы) келесідей анықталады.

Алдымен, кілт жұбын генерациялау үшін бет биометриясы қолданылады. Ол үшін пайдаланушының биометриялық деректерін жинау жүргізіледі. Камера немесе арнайы қабылдау құрылғысы арқылы бет сканерленеді, содан кейін жеке бет ерекшеліктерін сипаттайтын тұрақты ерекшелік векторын алу үшін ерекшеліктерді шығару алгоритмы қолданылады. Алынған шаблон коррекция әдістері арқылы қосымша өңдеуден өтеді, бұл

криптографиялық есептеулер үшін жарамды биометриялық ақпараттың тұрақты көрінісін қамтамасыз етеді. Бұл өңдеудің нәтижесі – криптографиялық хеш-функция арқылы биометриялық шаблонның хеш-мәнін bioH есептеу.

Келесіде SEEDprv мәні криптографиялық тұрғыдан тұрақты псевдослучайлы сандар генераторы арқылы сгенерленген r мәні мен bioH мәнінің конкатенациясынан хеш ретінде есептеледі. Бұл генерацияланатын кілттерді пайдаланушының бірегей биометриялық деректерімен байланыстыруға мүмкіндік береді, олардың нақты тұлғаға байланысын арттырады.

Сондай-ақ, криптографиялық тұрғыдан тұрақты псевдослучайлы сандар генераторы арқылы SK_PRF және SEEDpub мәндері алынады.

Алгоритмнің қалған компоненттері, мысалы, WOTS+ бір реттік қолтаңба схемасы үшін бір реттік құпия кілттер массивін (wots_sk) генерациялау және root хешін treeHash процедурасы арқылы есептеу, принципиалды өзгеріссіз қалады, тек SEEDprv қосымша биометриялық энтропияны қамтиды. Сол сияқты, индекс (idx) бір реттік кілттердің қолданылуын бақылау функциясын орындауды жалғастырады, биометрияға тәуелді болмайды. Сонымен қатар, OID (Object Identifier) – бұл XMSS алгоритмының параметрлерін анықтайтын бірегей идентификатор (мысалы, таңдалған хеш-функция, ағаштың биіктігі, WOTS+ параметрлері және т.б.). Ол ашық кілтке енгізіледі, осылайша кейіннен осы кілтпен жұмыс істейтін параметрлер мен стандарттармен нақты түсіну мүмкін болады, бұл әсіресе үйлесімділік пен қолтаңбаларды дұрыс тексеру үшін маңызды.

Бұл схемада блокчейн технологиясын интеграциялауға ерекше назар аударылады, ол ашық кілттер мен қолтаңбаларды таралған ортада сенімді сақтау мен тексеруді қамтамасыз етеді. Кілт жұбы қалыптасқаннан кейін, OID, root, SEEDpub-тан тұратын ашық кілт блокчейн желісінде тіркеледі, онда ол өзгермейтін реестрде сақталады. Мұндай тіркеу қолтаңбалардың шынайылығын тексеру үшін қолжетімді децентрализованное ашық кілттер қоймасын құруға мүмкіндік береді, бұл жүйенің қауіпсіздігі мен ашықтығын айтарлықтай арттырады. Блокчейнге енгізілген ақпарат тіркелу уақыты, транзакция идентификаторлары және басқа қызметтік деректер туралы метадеректерді қамтиды, бұл өзгерістер тарихын бақылауға және алаяқтық әрекеттерді болдырмауға мүмкіндік береді.

Осылайша, құпия кілт SEEDprv, idx, wots_sk, SK_PRF, root, SEEDpub-ты қамтиды, яғни $SK = SEED\|prv\|idx\|wots\_sk\|SK\_PRF\|root\|SEEDpub$, ал ашық кілт OID, root, SEEDpub-тан тұрады, яғни $PK = OID\|root\|SEEDpub$.

Осылайша, биометриялық деректерді алгоритмге интеграциялау SEED бастапқы мәндерін қалыптастыру кезеңінде жүзеге асырылады, бұл генерацияланатын кілттердің нақты пайдаланушыға байланысын арттырады. Бұл криптографиялық схеманың тұрақтылығын сақтай отырып, қосымша аутентификация деңгейіне қол жеткізуге мүмкіндік береді. Бет биометриясын интеграциялау генерацияланатын кілттердің нақты пайдаланушыға байланысын арттырады, бұл мүмкін.

Қорытынды. Биометрия мен блокчейннің интеграциясы биометриялық деректердің қауіпсіздігі мен тұтастығын қамтамасыз етуге көмектеседі, бұл рұқсатсыз кіруге және бұрмалауға жол бермейді. Блокчейнде бухгалтерлік кітапқа қосылған деректерді тексеріп, кітапқа қосқаннан кейін өзгерту немесе жою мүмкін емес. Бұл өзгермейтіндікке криптографиялық хэштеу және консенсус механизмдері арқылы қол жеткізіледі. Нәтижесінде блокчейнде сақталған биометриялық деректер рұқсатсыз кіруден және рұқсат етілмеген өзгертулерден қорғалған. Биометриялық деректерді криптографиялық хэштеу алгоритмдері арқылы бекітілген өлшемді таңбалар жолына (хэш) түрлендіруге болады. Бұл хэштер бастапқы деректердің бірегей көрінісі болып табылады және іс жүзінде қайтымсыз. Бұл хэштерді нақты биометриялық деректердің орнына блокчейнде

сақтау тиімді тексеру мен аутентификацияға мүмкіндік бере отырып, құпия ақпараттың ашылмауын қамтамасыз етеді. Блокчейнде сақталған биометриялық деректерге қол жеткізуді криптографиялық кілттер арқылы басқаруға болады. Пайдаланушылар өздерінің деректерімен өзара әрекеттесу үшін қажет жеке кілттерін толық бақылауға алады. Рұқсат етілмеген тұлғалар сәйкес жеке кілттерсіз деректерге қол жеткізе алмайды, бұл қауіпсіздікті арттырады. Бұзушылықтарды анықтау да қамтамасыз етіледі: блокчейнде сақталған биометриялық деректерді өзгерту әрекеті барлық кейінгі блоктардағы деректерді өзгертуді талап етеді, бұл блокчейннің бөлінген сипатына және оның консенсус механизмдеріне байланысты есептеу мүмкін емес. Кез келген бұзу әрекеттерін желі оңай анықтап, қабылдамайды. Блокчейн желілері кітаптың күйін тексеру және келісу үшін консенсус механизмдеріне сүйенеді. Бұл таратылған салыстыру процесі деректердің қауіпсіздігі мен тұтастығын одан әрі жақсартады. Деректерге өзгертулер желі қатысушыларының көпшілігі келіскен жағдайда ғана мүмкін болады. Биометриялық деректерді блокчейн желісіндегі түйіндер арасында таратуға болады, бұл бір сәтсіздік нүктесінің қаупін азайтады. Бұл таратылған жад деректердің жоғалуынан қорғаудың қосымша қабатын қосады. Биометриялық тексеру қажет болғанда, деректерді блокчейннен қауіпсіз түрде алуға және криптографиялық әдістерді қолдана отырып, түпнұсқа үлгімен салыстыруға болады. Үлгінің өзі ашылмағандықтан, процесс дәл тексеруді қамтамасыз ете отырып, құпиялылықты сақтайды. Блокчейн технологиясының мөлдір және бақыланыатын сипаты биометриялық деректермен барлық өзара әрекеттесулерді егжей-тегжейлі тексеруге мүмкіндік береді. Бұл аудит мүмкіндігі сәйкестік, есеп беру және кез келген күдікті әрекетті тексеру үшін пайдалы болуы мүмкін.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын айтады.

Алғыс. Жұмыс ҚР ҰҚМ ҒК, № AP19678000 «Биометрия есептері мен оның қосымшаларына, соның ішінде блокчейн технологиясы үшін QR кодтарды пайдаланудың қауіпсіз әдістері мен алгоритмдердің әзірлеу» қаржылық қолдауымен орындалды.

Әдебиеттер тізімі

- Delgado-Mohatar, O., Fierrez, J., Tolosana, R., & Vera-Rodriguez, R. (2020). Blockchain meets biometrics: Concepts, application to template protection, and trends. *arXiv:2003.09262 (cs.CV)*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.09262>
- Ghafourian, M., Sumer, B., Vera-Rodriguez, R., Fierrez, J., Tolosana, R., Morales, A., & Kindt, E. (2023). Combining blockchain and biometrics: A survey on technical aspects and a first legal analysis. *arXiv:2302.10883 (cs.CV)*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.10883>
- ITU-T Focus Group on Application of Distributed Ledger Technology (FG DLT). (2019). Technical specification FG DLT D3.1. Distributed ledger technology reference architecture.
- International Organization for Standardization. (2022). ISO 23257:2022. Blockchain and distributed ledger technologies. Reference architecture. ISO/TC 307.
- Стандартинформ. (2018). ГОСТ ИСО/МЭК 19794-1-2015. Информационные технологии. Биометрия. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 1. Структура (ИСО/МЭК 19794-1:2011, Информационные технологии. Форматы обмена биометрическими данными. Часть 1: Структура, IDT). Москва.
- Menezes, A., van Oorschot, P., & Vanstone, S. (1997). Handbook of applied cryptography. CRC Press.
- Bellaj, B., Ouaddah, A., Bertin, E., Crespi, N., & Mezrioui, A. (2022). SOK: A comprehensive survey on distributed ledger technologies. In 2022 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC) (pp. 1-16). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICBC54727.2022.9805533>
- Hassen O, A., Abdulhussein A., Darwish S., Othman Z.A., Tiun S., & Lotfy Y. (2020). Towards a secure signature scheme based on multimodal biometric technology application for IoT blockchain network. *Symmetry*, 12(10), 1699. <https://doi.org/10.3390/sym12101699>
- Kaga, Y., Fujio, M., Naganuma, K., Takahashi, K., Murakami, T., Ohki, T., & Nishigaki, M. (2017). A secure and practical signature scheme for blockchain based on biometrics. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Security and Privacy in Social Networks and Big Data (SocialSec 2017) (pp. 877-891). Springer. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-72359-4_55

- Казанцев, Е.И., & Иванов, А.И. (2019). Обзор средств создания криптологических ключей из биометрии пользователя. *Инжиниринг и технологии*, 4(1), 1–3. <https://doi.org/10.21685/2587-7704-2018-4-1-14>
- Стандартинформ. (2020). ГОСТ Р 52633.0-2006. Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадёжной биометрической аутентификации. Москва.
- Burnett, A., Byrne, F., Dowling, T., & Duffy, A. (2007). A biometric identity based signature scheme. *International Journal of Network Security*, 5(3), 317–326. [https://doi.org/10.6633/IJNS.200711.5\(3\).08](https://doi.org/10.6633/IJNS.200711.5(3).08)
- Janbandhu, P.K., & Siyal, M.Y. (2001). Novel biometric digital signatures for Internet-based applications. *Information Management & Computer Security*, 9(5), 205–212. <https://doi.org/10.1108/09685220110408022>
- Kwon, T., & Lee, J. (2004). Practical digital signature generation using biometrics. In A. Laganá, M.L. Gavrilova, V. Kumar, Y. Mun, C.J.K. Tan, & O. Gervasi (Eds.), *Computational science and its applications – ICCSA 2004* (Lecture Notes in Computer Science, vol. 3043, pp. 85–94). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-24707-4_85
- Takahashi, K., Matsuda, T., Murakami, T., Hanaoka, G., & Nishigaki, M. (2019). Signature schemes with a fuzzy private key. *International Journal of Information Security*, 18, 581–617. <https://doi.org/10.1007/s10207-019-00428-z>
- Shan, X., You, L., & Hu, G. (2021). Two efficient constructions for biometric-based signature in identity-based setting using bilinear pairings. *IEEE Access*, 9, 25973–25983. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3057064>
- Nagpal, R., & Nagpal, S. (2002). Biometric based digital signature scheme. Internet-Draft, draft-nagpal-biometric-digital-signature-00.txt.
- Islam, S. H., Das, A. K., & Khan, M. K. (2016). Design of a provably secure identity-based digital multi-signature scheme using biometrics and fuzzy extractor. *Security and Privacy in Communication Networks*, 9, 3229–3238. <https://doi.org/10.1002/sec.1528>
- Mohamed, S., Soltane, M., Messikh, L., & Zaoui, A. (2017). A review regarding the biometrics cryptography challenging design and strategies. *BRAIN. Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience*, 41–64.
- Patel, V.M., Ratha, N.K., & Chellappa, R. (2015). Cancelable biometrics: A review. *IEEE Signal Processing Magazine*, 32(5), 54–65. <https://doi.org/10.1109/MSP.2015.2434151>
- Buchmann, J., Dahmen, E., & Huelsing, A. (2011). XMSS – A practical forward secure signature scheme based on minimal security assumptions. In *Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 7071, pp. 1–17). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-25405-5_8

Information about authors

Kaziyeva Nazym – acting associate professor, NJSC "L. N. Gumilyov Eurasian National University", Astana, Kazakhstan, kaziyevanm@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7559-1795, Phone: +7 7017951787

Ospanov Ruslan – doctoral student, NJSC "L. N. Gumilyov Eurasian National University", Astana, Kazakhstan, ospanovrm@gmail.com, ORCID 0000-0002-0771-575x, Phone: +7 701 816 7966

Zernov Dmitry – chief engineer, JSC "NC "Kazakhstan Garysh Sapary", Astana, Kazakhstan, Astana, Kazakhstan, d.zernov@gharysh.kz, Phone: +7 701 657 8807

Kaliyev Arman – Chief Engineer, Group 42 Holding Ltd, Abu Dhabi, United Arab Emirates, ORCID ID: 0000-0001-8399-8379, kaliyev.arman@yandex.kz, +971 52 500 7989

АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
AUTOMATION AND CONTROLDOI 10.51885/1561-4212_2025_2_144
IRSTI 28.17.31A.L. Krasavin¹, G.M. Nazenova², D.L. Alontseva³, K. Askaduly⁴

D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

¹E-mail: akrassavin@ektu.kz²E-mail: nazenova.g@edu.ektu.kz*³E-mail: dalontseva@ektu.kz⁴E-mail: kaskaduly@edu.ektu.kz

TRAJECTORY TRACKING SIMULATION OF A WHEELED MOBILE ROBOT

ДӨҢГЕЛЕКТІ МОБИЛДІ РОБОТТЫҢ ҚОЗФАЛЫС ТРАЕКТОРИЯСЫН МОДЕЛЬДЕУ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНОГО
МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Abstract. This paper presents an event-driven structure for modeling trajectory tracking of a wheeled mobile robot. The robot's controller is modeled by a virtual microcontroller. Control algorithms are implemented in event handlers, which can be viewed as analogs of interrupt handlers of a real microcontroller. The goal of the research was to create a simulator that allows testing trajectory control methods for wheeled robots, implemented as programs for microcontrollers operating as part of control systems. In this case, for one dynamic model of the robot, different control algorithms are implemented by different program code of the event handlers of the virtual controller. The feature of the developed simulator of the microcontroller control system for a wheeled mobile robot is that it allows testing the program code implementing the software implementation of the mobile robot control controller. This feature distinguishes this new type of simulator from simulators created using traditional methods and opens up good prospects for using such simulators in education for organizing laboratory work in disciplines related to the design of microcontroller control systems and allows using virtual equivalents of control system components that are not available or poorly suited for conducting full-scale experiments.

Keywords: Trajectory tracking simulation, wheeled mobile robot, event-driven programming, dynamic modeling of a mobile robot.

Аңдатпа. Бұл мақалада доңғалақты мобильді роботтың траекториясын бақылауды модельдеуге арналған оқиғаға негізделген құрылым ұсынылған. Робот контроллері виртуалды микроконтроллер арқылы модельденеді. Басқару алгоритмдері оқиға өңдеушілерінде жүзеге асырылады, оларды нақты микроконтроллердің үзу өңдеулерінің аналогтары деп санауға болады. Зерттеудің мақсаты басқару жүйелерінің бөлігі ретінде жұмыс істейтін микроконтроллерлерге арналған бағдарламалар ретінде іске асырылатын доңғалақты роботтардың траекториясын басқару әдістерін сынауға мүмкіндік беретін симуляторды құру болды. Сонымен қатар, бір динамикалық робот үлгісі үшін әртүрлі басқару алгоритмдері виртуалды контроллер оқиғаларын өңдеушілердің әртүрлі бағдарламалық кодтары арқылы жүзеге асырылады. Доңғалақты мобильді роботқа арналған микроконтроллерді басқару жүйесінің әзірленген симуляторының ерекшелігі, ол мобильді роботты басқару контроллерінің бағдарламалық іске асыруын жүзеге асыратын бағдарламалық кодты сынауға мүмкіндік береді. Бұл мүмкіндік тренажерлардың жаңа түрін дәстүрлі әдістермен жасалған тренажерлерден ерекшелендіреді, және микроконтроллерлерді басқару жүйелерін жобалаумен байланысты пәндер бойынша зертханалық жұмыстарды ұйымдастыру үшін білім беруде осы тектес тренажерларды пайдаланудың жақсы перспективаларын ашады, және толық ауқымды эксперименттер жүргізу үшін қол жетімсіз немесе жарамсыз басқару жүйесінің құрамдас бөліктерінің виртуалды эквиваленттерін пайдалануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: Траекторияны қадағалауды модельдеу, доңғалақты мобильді робот, оқиғаға негізделген бағдарламалау, мобильді роботты динамикалық модельдеу.

Аннотация. В данной статье представлена событийно-управляемая структура для моделирования отслеживания траектории колесного мобильного робота. Контроллер робота моделируется виртуальным микроконтроллером. Алгоритмы управления реализуются в обработчиках событий, которые можно рассматривать как аналоги обработчиков прерываний реального микроконтроллера. Целью исследования было создание симулятора, позволяющего тестировать методы траекторного управления колесными роботами, реализуемыми как программы для микроконтроллеров, работающих в составе систем управления. При этом для одной динамической модели робота различные алгоритмы управления реализуются разным программным кодом обработчиков событий виртуального контроллера. Особенность разработанного симулятора микроконтроллерной системы управления колесным мобильным роботом в том, что он позволяет тестировать программный код, реализующий программную реализацию контроллера управления мобильным роботом. Эта черта отличает новый тип симуляторов от симуляторов, создаваемых традиционными методами, и открывает хорошие перспективы применения симуляторов такого рода в образовании для организации лабораторных работ по дисциплинам, связанным с проектированием микроконтроллерных систем управления и позволяет использовать виртуальные эквиваленты компонентов системы управления, недоступные или малопригодные для проведения натурных экспериментов.

Ключевые слова: Моделирование отслеживания траектории, колесный мобильный робот, событийно-управляемое программирование, динамическое моделирование мобильного робота.

Introduction. The two-wheeled differential drive robot is a widely popular design among mobile robots (Manoharan et al., 2024; Hassan & Saleem, 2022; Mata-Machuca et al., 2021). This design features two independently powered wheels and a third, freely rotating castor wheel for stability. By controlling the power supplied to the motors, the robot can move forward, rotate in place, or navigate along any arbitrary curve within a plane (Zhao et al., 2023; He et al., 2024). Due to the simplicity of the design and availability of the necessary components, Differential Drive Wheeled Robot (DDWR) robots are popular in amateur robotics and are widely used in education (Fahmizal et al., 2024). MATLAB/Simulink environment is often used for computer simulation of DDWR robots (Channareth et al., 2022; Fernando & GanLim, 2021). This approach to computer simulation of wheeled mobile robot control systems is very popular and well-documented in the technical literature. In particular, articles (Nair et al., 2016; Mirzaeinejad et al., 2018; Gao et al., 2021) provide a detailed description of the application of this approach to the task of computer simulation of the trajectory control process of a DDWR robot that we are interested in. Typically, when using the Simulink/Matlab combination, the control laws are defined using the same graphical design methods as the physical-mathematical model of the robot. This is a very convenient approach for modeling control systems that operate on continuous signals, as the modeling environment offers numerous ready-to-use tools for signal operations described by continuous functions of time, such as ordinary differential equation (ODE) solvers, differentiation and integration blocks, and so on. However, in the vast majority of cases, mobile robots (particularly DDWRs) operate under the control of a microcontroller or a single-board computer. The data read by the microcontroller unit (MCU) from sensors (feedback signals of the microcontroller control system) are discrete, not continuous signals. The mobile robot control controller is implemented in software and represents a discrete control system. As is known, even in cases where a microcontroller control system simulates the operation of a continuous control system (as an example, one can cite numerous software implementations of PID controllers), the specifics of the control system implementation often make its simulation inadequate by means intended for simulating continuous systems. On the other hand, debugging microcontroller programs controlling mobile robots (especially autonomous mobile robots) is often extremely difficult. It would be highly desirable to have a simulation environment for microcontroller control systems for mobile robots that allows simulating the operation of the microcontroller controlling the system. It is particularly desirable that such a simulation environment allows simulating the execution of

specific software code loaded into the microcontroller, similar to the Proteus electronic circuit simulation environment. This paper describes a prototype software simulator for a DDWR robot's microcontroller control system, which possesses these desirable features. The main distinguishing feature of our proposed scheme for simulating the operation of a wheeled mobile robot's microcontroller control system is the concept of a *virtual microcontroller* that interacts with the *hardware environment simulator*. The software virtual microcontroller is a set of user-defined functions simulating interrupt handlers of the real microcontroller controlling the DDWR robot. During the simulation session, the hardware environment simulator code calls these functions, simulating hardware interrupts from timers setting the control system timing, as well as interrupts generated by the microcontroller's built-in capture blocks. The simulation system provides the user with an API that allows reading data from virtual sensors generated by the hardware environment simulator during the execution of virtual interrupt handler code, as well as setting so-called control codes, simulating robot motor control. The set of virtual interrupt handlers corresponds to the event-driven MCU control application framework, practically applied for creating embedded applications. This framework is described further in Section 4 of this paper. The hardware environment of the simulated microcontroller control system for the mobile robot is described in Section 3. Obviously, in order to create a simulator, it is necessary to have both a kinematic and a dynamic model of the DDWR. Descriptions of the kinematic and dynamic models of the DDWR robot used are given in Sections 1 and 2 respectively.

1. Kinematic and dynamic models of a DDWR robot.

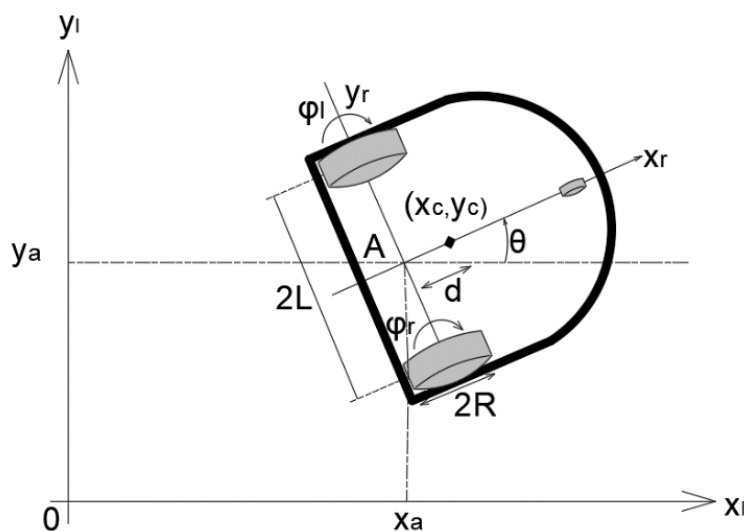


Figure 1. A diagram of a DDWR robot

Note – compiled by the authors based on (Dhaouadi & Hatab, 2013)

Let $\{X_I, Y_I\}$ denote the fixed Cartesian inertial frame and $\{X_r, Y_r\}$ denote the moving Cartesian frame of the robot. The origin of the robot frame is at point A, located at the midpoint of the axis between the wheels. The center of mass of the robot (point C) is assumed to be located on the axis of symmetry, at a distance d from point A.

The motion of the differential drive mobile robot is characterized by two nonholonomic constraint equations, which are obtained using two main assumptions:

No lateral slip motion: This constraint simply means that the robot can move only in a curved motion (forward and backward) but not sideward. In the robot frame, this condition means that the velocity of the center-point A is zero along the lateral axis:

$$\dot{y}_\alpha^r = 0 \quad (1)$$

Pure rolling constraint: The pure rolling constraint represents the fact that each wheel maintains a one contact point P with the ground. There is no slipping of the wheel in its longitudinal axis and no skidding in its orthogonal axis. The velocities of the contact points in the robot frame are related to the wheel velocities by:

$$\begin{cases} v_{pR} = R\dot{\phi}_R \\ v_{pL} = R\dot{\phi}_L \end{cases} \quad (2)$$

the three constraint equations can be written in the following matrix form:

$$\Lambda(q)\dot{q} = 0, \quad (3)$$

where

$$\Lambda(q) = \begin{bmatrix} -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & L & -R & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & -L & 0 & -R \end{bmatrix} \quad (4)$$

and

$$\dot{q} = [\dot{x}_\alpha \ \dot{y}_\alpha \ \dot{\theta} \ \dot{\phi}_R \ \dot{\phi}_L]^T \quad (5)$$

The kinematic model of the differential drive mobile robot is actually quite simple and is described by two well-known equations (6) and (7) for the linear velocity of the robot's center of mass v and the angular velocity $\omega = \dot{\theta}$ of the robot.

$$v = \frac{v_R + v_L}{2} = R \frac{(\dot{\phi}_R + \dot{\phi}_L)}{2} \quad (6)$$

$$\omega = \frac{v_R - v_L}{2L} = \frac{(\dot{\phi}_R - \dot{\phi}_L)}{2} \quad (7)$$

The Lagrange-Euler equations for the DDWR have the form (8):

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial q_i} = F - \Lambda^T(q)\lambda, \quad (8)$$

where $L=T-V$ is the Lagrangian function, T , is the kinetic energy of the system, V is the potential energy of the system, q_i are the generalized coordinates, F is the generalized force vector, Λ is the constraints matrix, and λ is the vector of Lagrange multipliers associated with the constraints. As shown in the paper (Dhaouadi & Hatab, 2013), the equations in Lagrange form (8) are equivalent to the equation of motion of the mobile robot (9).

$$\begin{cases} \left(m + \frac{2I_w}{R^2} \right) \dot{v} - m_c d \omega^2 = \frac{1}{R} (\tau_r + \tau_L) \\ \left(I + \frac{2L^2}{R^2} I_w \right) \dot{\omega} + m_c d \omega v = \frac{L}{R} (\tau_r - \tau_L), \end{cases} \quad (9)$$

where τ_R and τ_L – moments of friction forces applied to the right and left wheels of the robot respectively (since we assume that the wheels move without slipping, τ_R and τ_L are equal to the

torque of the corresponding electric motors), d – distance from the center of mass of the robot to the axis passing through the centers of the robot's wheels, m_c – mass of the mobile robot without wheels and motors attached to the wheels, $m = m_c + 2 \cdot m_w$ – the total mass of the robot (m_w – mass of the wheel with a gearmotor attached to it), $I = I_c + m_c d^2 + 2m_w L^2 + 2I_m$ the moment of inertia of the mobile robot about the vertical axis passing through point A (the center of the robot's wheel axle) (I_c – the moment of inertia of the robot (without wheels and motors) about the vertical axis passing through the center of mass, I_m – the moment of inertia of the wheel about the vertical axis passing through the center of the wheel), I_w – the moment of inertia of the robot wheel about the horizontal axis passing through the center of the wheel. Next, taking into account the kinematic equalities (6) and (7), we obtain from (9) the equations of motion in the form (10).

$$\begin{cases} \ddot{\phi}_R = f_1(\dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L, \tau_R, \tau_L) \\ \ddot{\phi}_L = f_2(\dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L, \tau_R, \tau_L) \end{cases} \quad (10)$$

We do not give the analytical expressions for f_1 and f_2 due to their complexity, but we note that obtaining these expressions is a completely trivial task. The DC commutator motor, installed on the robot are described by equations (11).

$$\begin{cases} v_a = R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a \\ e_a = K_b \omega_{m\alpha} \\ e_a = K_i i_a \\ \tau = N \tau_m \end{cases}, \quad (11)$$

where, i_a is the armature current, (R_a, L_a) (where the index α takes the values $\{R, L\}$) is the resistance and inductance of the armature winding respectively, e_a is the back emf, $\omega_{m\alpha}$ is the rotor angular speed, τ_m is the motor torque, (K_i, K_b) are the torque constant and back emf constant respectively, N is the gear ratio, and is τ the output torque applied to the wheel. Since in the DDMR the motors are mechanically coupled to the robot wheels through the gears, the mechanical equations of motion of the motors are linked directly with the mechanical dynamics of the DDMR. Therefore, for each dc motor, the expression (12) holds.

$$\omega_{m\alpha} = N \dot{\phi}_\alpha \quad (12)$$

From system (11) taking into account (12), we can obtain the equation (13):

$$\dot{\tau}_a = \left(\frac{K_t}{L_a}\right) v_a - \left(\frac{R_a K_t}{L_a}\right) \tau_a - \left(\frac{K_t K_b N}{L_a}\right) \dot{\phi}_\alpha \quad (13)$$

In the four-dimensional phase space $(\dot{\phi}_R, \dot{\phi}_L, \tau_R, \tau_L)$ equations (10) and (13) define the equation of motion of the system in canonical form (14):

$$\dot{x} = f(x, u), \quad (14)$$

where $x(t) = (\dot{\phi}_R(t), \dot{\phi}_L(t), \tau_R(t), \tau_L(t))$ – the state vector of the system, and $u(t) = (u_L(t), u_R(t))$ – the control signal vector.

2. Structure of the Microcontroller Control System for a Two-Wheeled Differential Drive Mobile Robot. We assume the mobile robot is controlled by a microcontroller or a single-board computer. Consequently, we consider a discrete-time control system, whose block diagram is depicted in Figure 2. We assume that the mobile robot is equipped with DC commutator gearmotors with integrated rotary encoders. The rotary encoder outputs a predefined number of pulses per revolution of the gearbox shaft. Processing data from the integrated encoders allows

achieving two goals. First, based on the encoder data, it is possible to reconstruct discrete signals representing the dependence of the mobile robot's wheel rotation angular velocity on time. Second, access to the encoder data allows building an odometric system for determining the position and orientation of the mobile robot (obviously, in the absence of slippage of the robot's wheels).

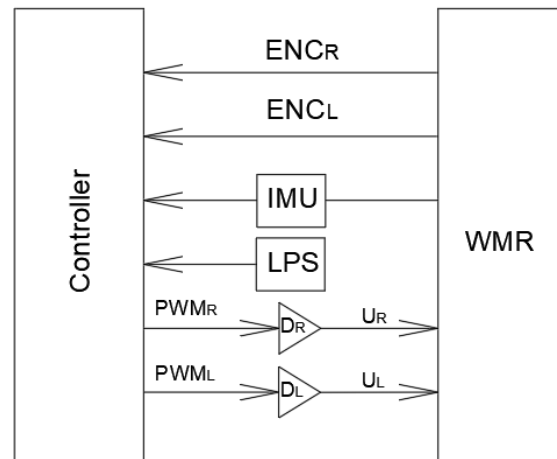


Figure 2. Block Diagram of the Microcontroller Control System for a Two-Wheeled Mobile Robot

Note – compiled by the author

The controller is a microprocessor board or a single-board computer. D_R and D_L denote the DC commutator motor drivers of the mobile robot. PWM_R and PWM_L are low-voltage pulse-width modulated signals controlling the motor drivers of the right and left wheel, respectively. ENC_R and ENC_L are the signals from the encoders of the robot's right and left motors, IMU is a MEMS inertial sensor unit, LPS (Local Positioning System) is a unit of the local positioning system.

3. *Structure of a microcontroller program controlling a mobile robot. Timing organization.* Let T denote the duration of the working cycle of the microcontroller-based control system. At time instants $t_k = k \cdot T$, where k is an integer index, the control signal $u(t)$ is updated. During the working cycle (over the time interval $[t_k, t_{k+1}]$) the controller is engaged in collecting data from sensors. The timing is set by one of the microcontroller's built-in timers. Timing is set by one of the microcontroller's built-in timers. Timer interrupts occur at a fixed time interval τ . During timer interrupt processing, sensors are polled (such as MEMS inertial sensors and local positioning systems) and the acquired readings of discrete signals are stored in corresponding data structures (e.g., circular buffers) in the microcontroller's RAM memory. Therefore, the interval τ can be considered as the discretization step for feedback signals. The duration of the working cycle T is chosen so that it contains a whole number M of time intervals τ , i.e. $T = M \cdot \tau$. The time instants t_k are determined by the overflow of a software-implemented counter modulo M (the counter is incremented at each timer interrupt). Encoder pulses are processed by the microcontroller's built-in capture units. The use of hardware capture units allows measuring the time intervals between encoder pulse edges in the clock cycles of the timer source associated with the respective capture unit. To organize encoder data reading, interrupt processing is performed, the source of which are the engaged capture units. Interrupts are generated upon the arrival of encoder pulse edges (it is obvious that interrupts generated by capture units are not synchronized with timer interrupts). After the working cycle is completed,

code implementing a software control unit for managing the mobile robot is executed, i.e., control codes c_k^1 и c_k^2 are calculated based on the readings of discrete sensor signals (feedback signals). Subsequently, after control code calculation, depending on the hardware implementation of the robot's motor drive, the control codes are either loaded into the duty cycle control registers of the pulse-width modulated (PWM) signal (when controlling motors using H-bridge drivers) or loaded into digital-to-analog converters (DACs) controlling the motor drive with analog control input, or transmitted over one of the standard serial communication interfaces (such as UART, SPI, I2C) to digitally controlled drives. Let us $u_1^*(t)$ and $u_2^*(t)$ as step functions, defined by the equations (15).

$$\forall t \in [t_k, t_{k+1}] \quad u_j^*(t) = u_j^k \quad u_j^k = u_{max} \cdot \left\lfloor \frac{c_k}{c_{max}} \right\rfloor, \quad (15)$$

where $j = \{1, 2\}$, and $c_{max} = 2^N - 1$. In the last equation, the integer N is the resolution of the PWM or DAC, used for controlling the mobile robot's motors. Obviously, it is assumed that the values of the control codes c_k^1 и c_k^2 are limited to the value c_{max} , i.e. $\forall k \quad c_k^1, c_k^2 \in \{0, 1, \dots, c_{max}\}$. Assuredly, the actual control signals should be described by a continuous function $u_j(t)$. We adopt a control signal model of the form (16), where the parameter value $\lambda > 0$ is chosen such that $\frac{1}{\lambda} \ll T$.

$$\forall t \in [t_k, t_{k+1}] \quad u_j(t) = u_j^{k-1} + (1 - e^{-\lambda(t-t_k)})(u_j^k - u_j^{k-1}), \quad (16)$$

4. *Structure and principles of operation of a simulator for an autonomous wheeled mobile robot with a microcontroller-based control system.* The simulator is structurally divided into two modules: a hardware environment simulator module and a virtual control controller module. Functionally, the virtual controller represents four user-defined functions – three virtual interrupt handlers with predefined names and signatures, and also a user-defined *Init()* function, as well as the simulator's API – a set of functions implemented in the hardware environment simulator code, available to the user when writing the code for virtual interrupt handlers. All user-defined functions of the virtual controller are called only from the hardware environment simulator code. The *Init()* function is called by the hardware environment simulator at the beginning of the simulation process. It is assumed that user-defined variables are initialized and dynamic data structures are created in the code of the *Init()* function. Furthermore, it is assumed that the call to the *Init()* function coincides with the beginning of the first working cycle of the simulation process and the user has the ability to set the initial values of the control codes c_0^1 and c_0^2 in the code of the *Init()* function by calling the simulator API function *SetControlCodes(int cc₁, int cc₂)*. The actual simulation process is based on sequentially calculating the dependence of the system state vector $x(t) = (\dot{\phi}_R(t), \dot{\phi}_L(t), \tau_R(t), \tau_L(t))$ on time at time intervals $[t_k, t_{k+1}]$ working cycles of the virtual mobile robot controller). At the beginning of each simulation step, the hardware environment simulator calls a user-defined virtual interrupt handler function from timer *timer_1_interrupt_handler()*. It is assumed that timer 1 interrupts correspond to the end of the current working cycle of the virtual microcontroller. In the interrupt handler, new values of the control codes c_k^1 and c_k^2 are set for the next k – the working cycle ($[t_k, t_{k+1}]$ time interval). Since the values of the control codes c_k^1 and c_k^2 Since the values of the control codes $u(t)$ on the interval $[t_k, t_{k+1}]$ according to equations (16), solving the system dynamics equation ($\dot{x} = f(x, u)$) on the interval $[t_k, t_{k+1}]$ reduces to an initial value problem for an ODE system of the form (17):

$$x(t_k) = x_{t_k} \quad \dot{x} = g(x, t), \quad (17)$$

where the initial value x_{t_k} is the value of $x_{pr}(t_k)$ ($x_{pr}(t)$ the dependence of the system state vector $x(t)$ on time on the interval $[t_{k-1}, t_k]$, calculated on the previous simulation step, and the function $g(x, t)$ is defined by equation (18).

$$g(x, t) = f(x, u(t)) \quad (18)$$

For numerical solution of the system of ordinary differential equations (4), we used the `solve_ivp` ODE solver from the SciPy library. Among the input parameters of the `solve_ivp` there is the `method` parameter, which allows us to choose one of several numerical methods implemented in the library for solving the initial value problem for ODE systems.

We used the Explicit Runge-Kutta method of order 5 (17) (Dormand & Prince, 1980). The solution of the ODE system (18) gives discretely defined functions $\phi_R(t)$ and $\phi_L(t)$ on the interval $[t_k, t_{k+1}]$ (dependencies on time of the angular velocities of rotation of the right and left wheels of the mobile robot). First, based on these data, kinematic characteristics such as the dependence of the magnitude of the linear velocity of the mobile robot on time and the dependence of the angular velocity of the robot on time are restored. Combining these data with the data obtained in previous steps of the simulation process, numerical integration methods are used to calculate the robot's trajectory on the plane. The next step of the simulation process is to perform a sequence of calls to the user-defined virtual interrupt handler function from timer `timer_2_interrupt_handler()`. It is assumed that timer 2 interrupts correspond to the cycles of data collection by the virtual microcontroller program. In the `timer_2_interrupt_handler()` interrupt handler, data on the current position and orientation of the virtual robot is typically requested. After the procedures described above are completed, the simulation proceeds to the next step for the next working cycle (time interval $[t_{k+1}, t_{k+2}]$).

While articles (Zangina et al., 2020) and (Mikova, 2023) provide valuable insights into kinematic and dynamic modeling, their simulation approaches are less suited for capturing the complexities of microcontroller-based control systems. Our proposed method distinguishes itself with a more realistic and practical simulation approach, making it a more powerful tool for testing and evaluating control algorithms for wheeled mobile robots, particularly in educational settings.

Conclusions. The wheeled mobile robot microcontroller system simulator presented in this paper enables testing of program code that implements the software for the robot's control system. This feature distinguishes the presented new type of simulator from simulators created using traditional methods in a radical way, opening up promising opportunities for using such simulators in education.

Primarily, simulators of this type are well-suited for organizing laboratory work in disciplines related to designing microcontroller control systems. The simple API of the simulation system, available when writing virtual controller code, allows for a focus on control problems without being distracted by numerous minor issues characteristic of low-level embedded programming. Additionally, the simulator allows for the use of virtual equivalents of control system components that are unavailable or poorly suited for conducting full-scale experiments.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements. This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP19679327).

References

- Manoharan, S. K., Raghavan, D., Megalingam, R. K., Parakat, P., & Sudheesh, S. K. (2024). Fine-tuning mobility: PID driven velocity control optimization for two-wheel differential drive robot. Proceedings of the 2024 Parul International Conference on Engineering and Technology (PICET). <https://doi.org/10.1109/PICET60765.2024.10716137>

- Hassan, N., & Saleem, A. (2022). Neural network-based adaptive controller for trajectory tracking of wheeled mobile robots. *IEEE Access*, 10(4), 13582–13597. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146970>
- Mata-Machuca, J. L., Zarazua, L. F., & Aguilar-Lopez, R. (2021). Experimental verification of the leader-follower formation control of two wheeled mobile robots with obstacle avoidance. *IEEE Latin America Transactions*, 19(8), 1417–1424. <https://doi.org/10.1109/TLA.2021.9475873>
- Zhao, T., Wang, Y., Li, G., & Hou, G. (2023). Lyapunov-based global trajectory tracking control of wheeled mobile robot. *Journal of Physics: Conference Series*, 2478(10), 102018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2478/10/102018>
- He, X., Han, X., Wei, T., & Li, X. (2024). Tracking control of wheeled mobile robots via intermittent control. *Mathematical Biosciences & Engineering*, 21, 3774–3783. <https://doi.org/10.3934/mbe.2024167>
- Fahmizal, F., Pratikno, M. S., Isnianto, H. N., Mayub, A., Maghfiroh, H., & Anugrah, P. (2024). Control and navigation of differential drive mobile robot with PID and Hector SLAM: Simulation and implementation. *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI)*, 10(3), 594–607. <https://doi.org/10.26555/jiteki.v10i3.29428>
- Channareth, S., Vannsinh, L., & Virbora, N. (2022). Experimental in head tracking control of a four-OMNI wheeled mobile robot system. *Indonesian Journal of Engineering and Science*, 3(3), 15–26. <https://doi.org/10.51630/ijes.v3i3.67>
- Fernando, A., & GanLim, L. (2021). Velocity analysis of a six-wheel modular mobile robot using MATLAB-Simulink. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1109(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1109/1/012037>
- Nair, L., & Saju, K. K. (2016). Modelling and trajectory tracking of wheeled mobile robots. *Procedia Technology*, 24, 538–545. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.094>
- Mirzaeinejad, H., & Shafei, A. M. (2018). Modeling and trajectory tracking control of a two-wheeled mobile robot: Gibbs–Appell and prediction-based approaches. *Robotica*, 36(10), 1551–1570. <https://doi.org/10.1017/S0263574718000565>
- Gao, X., Yan, L., & Gerada, C. (2021). Modeling and analysis in trajectory tracking control for wheeled mobile robots with wheel skidding and slipping: Disturbance rejection perspective. *Actuators*, 10(9), 1–15. <https://doi.org/10.3390/act10090222>
- Dhaouadi, R., & Hatab, A. (2013). Dynamic modelling of differential-drive mobile robots using Lagrange and Newton-Euler methodologies: A unified framework. *Advances in Robotics and Automation*, 2(2). <https://doi.org/10.4172/2168-9695.1000107>
- Dormand, J. R., & Prince, P. J. (1980). A family of embedded Runge-Kutta formulae. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 6(1), 19–26. [https://doi.org/10.1016/0771-050X\(80\)90013-3](https://doi.org/10.1016/0771-050X(80)90013-3)
- Zangina, U., Buyamin, S., Abidin, M., Mahmud, M., & Hasan, H. S. (2020). Non-linear PID controller for trajectory tracking of a differential drive mobile robot. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 43(7), 255–270.
- Mikova, L. (2023). Design of a functional model of a three-wheeled mobile robot. *Technical Sciences and Technologies*, 33(3), 53–58. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3\(33\)-53-58](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3(33)-53-58)

Information about authors

Krasavin Alexander – a candidate of physical and mathematical sciences, D. Serikbaev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, akrassavin@ektu.kz

Nazenova Gaukhar – a doctoral student, D. Serikbaev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, nazenova.g@edu.ektu.kz, ORCID: 0000-0002-5415-094X, +7 707 903 12 09

Alontseva Darya – a professor, D. Serikbaev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, dalontseva@ektu.kz

Askaduly Kanat – a doctoral student, D. Serikbaev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, kaskaduly@edu.ektu.kz

МЕДИЦИНАДАҒЫ АҚПАРАТТЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ
INFORMATION TECHNOLOGIES IN MEDICINE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_153
MFTAA 28.23.15

**А.С. Құмарқанова¹, А.К. Танкибаева², А.С. Тлебалдинова³,
М.А. Карменова⁴, С.К. Кумаргажанова⁵**

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

¹E-mail: akumarkanova@edu.ektu.kz*

²E-mail: tankibaeva_akerke@mail.ru

³E-mail: atlebaldinova@edu.ektu.kz

⁴E-mail: mmm_0582@mail.ru

⁵E-mail: skumargazhanova@gmail.com

**СҮЗГІЛЕУ ЖӘНЕ САПАНЫ БАҒАЛАУ НЕГІЗІНДЕ
МРТ КЕСКІНДЕРІН ӨҢДЕУДІҢ КЕШЕНДІ ТӘСІЛІ**

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРЕДОБРАБОТКЕ МРТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ
ФИЛЬТРАЦИИ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА**

**COMPREHENSIVE APPROACH TO MRI IMAGE PREPROCESSING BASED
ON FILTERING AND QUALITY ASSESSMENT**

Аңдатпа. Магнитті-резонанстық томография (МРТ) өзінің жоғары ақпараттылығына байланысты заманауи диагностикада маңызды орын алады, дегенмен кескін алудың техникалық ерекшеліктері, артефактілер мен шу көбінесе нәтижелердің визуалды дәлдігін төмендетеді. Бұл мақалада әртүрлі сүзу әдістерін қолдану арқылы МРТ кескіндерінің сапасын жақсарту міндеті қарастырылады. Зерттеу үш сүзу әдісін салыстырмалы талдауға бағытталған: жиектерді бөлектеуге арналған Лаплас сүзгісі, текстураны сақтай отырып, шуды азайтуға арналған Non-Local Means (NLM) алгоритмі және айқындықты жақсарту үшін Unsharp Mask әдісі. Негізгі міндет шуды жою, диагностикалық маңызды бөлшектерді сақтау және визуалды айқындылықты жақсарту арасындағы тепе-теңдікті табу болып табылады. Әдістердің тиімділігін бағалау үшін сандық көрсеткіштер (MSE, PSNR, SSIM) және кескіндердің визуалды айқындылығын субъективті бағалау қолданылды. Эксперименттер әртүрлі сканерлерден алынған FS, SE, FSE және TSE импульстік тізбектері бар PD, T1, T2 визуализациялау режимдерінің МРТ кескіндерін қамтитын әр текті деректерде жүргізілді. Нәтижесінде шуды басу мен диагностикалық маңызды ақпаратты сақтау арасындағы тепе-теңдікті сақтай отырып, сүзуді визуализациялау режимдерінің ерекшеліктеріне бейімдеуге мүмкіндік беретін аралас өңдеу тәсілі әзірленді. Әдістерді әр текті деректерге бейімдеуге ерекше назар аударылды, бұл кескіндер әртүрлі өндірушілердің жабдықтарында алынуы мүмкін клиникалық тәжірибе үшін өзекті болып табылады. Ұсынылған тәсіл интеллектуалды диагностикалық жүйелерде, соның ішінде машиналық оқыту алгоритмдерінде кейінгі талдау үшін МРТ деректерін өңдеуді стандарттауға мүмкіндік береді. Зерттеу клиникалық релевантты шешімдерді әзірлеу үшін сандық көрсеткіштер мен сараптамалық бағалауды біріктірудің маңыздылығын атап өтеді. Ал алынған нәтижелер ұсынылған әдістің тиімділігін және оның МРТ деректерін талдаудың автоматтандырылған жүйелерінде қолдану мүмкіндігін көрсетеді.

Түйін сөздер: кескін сапасы, МРТ кескіндер, алдын ала өңдеу, сүзу әдістері, сапаны бағалау әдістері.

Аннотация. Магнитно-резонансная томография (МРТ) занимает важное место в современной диагностике в силу своей высокой информативности, однако технические особенности получения изображений, артефакты и шумы часто снижают визуальную точность результатов. В данной статье рассматривается задача улучшения качества МРТ-изображений путём применения различных методов фильтрации. Исследование фокусируется на сравнительном анализе трёх методов фильтрации: фильтра Лапласа для выделения краёв, алгоритма Non-

Local Means (NLM) для шумоподавления с сохранением текстур и Unsharp Mask для усиления резкости. Ключевой задачей является поиск баланса между устранением шумов, сохранением диагностически значимых деталей и улучшением визуальной чёткости. Для оценки эффективности методов использовались количественные метрики (MSE, PSNR, SSIM) и субъективная оценка визуальной чёткости изображений. Эксперименты проводились на разнородных данных, включающих МРТ-изображения режимов PD, T1, T2 с импульсными последовательностями FS, SE, FSE и TSE, полученные от различных сканеров. В результате был разработан комбинированный подход к предобработке, который позволил адаптировать фильтрацию к специфике режимов визуализации, сохраняя баланс между подавлением шумов и сохранением диагностически значимой информации. Особое внимание уделено адаптации методов к неоднородным данным, что актуально для клинической практики, где изображения могут быть получены на оборудовании разных производителей. Предложенный подход позволяет стандартизировать предобработку МРТ-данных для последующего анализа в интеллектуализированных диагностических системах, включая алгоритмы машинного обучения. Исследование подчёркивает важность комбинирования численных метрик и экспертной оценки для разработки клинически релевантных решений. А представленные результаты демонстрируют эффективность предложенного метода и его потенциал для использования в автоматизированных системах анализа МРТ-данных.

Ключевые слова: качество изображения, МРТ изображения, предварительная обработка, методы фильтрации, методы оценки качества.

Abstract. Magnetic resonance imaging (MRI) occupies an important place in modern diagnostics due to its high informativeness, but technical features of image acquisition, artefacts and noise often reduce the visual accuracy of the results. This article addresses the problem of improving the quality of MRI images by applying different filtering techniques. The study focuses on a comparative analysis of three filtering methods: Laplace filter for edge extraction, Non-Local Means (NLM) algorithm for texture preserving noise reduction and Unsharp Mask for sharpening. The key challenge is to find a balance between removing noise, preserving diagnostically relevant details and improving visual sharpness. Quantitative metrics (MSE, PSNR, SSIM) and subjective assessment of visual sharpness of images were used to evaluate the effectiveness of the methods. Experiments were performed on heterogeneous data comprising MR images of PD, T1, T2 imaging modes with FS, SE, FSE and TSE pulse sequences obtained from different scanners. As a result, a combined preprocessing approach was developed to adapt filtering to the specificity of imaging modes, maintaining a balance between noise suppression and preservation of diagnostically relevant information. Special attention is paid to the adaptation of methods to heterogeneous data, which is relevant for clinical practice, where images can be acquired on equipment of different manufacturers. The proposed approach allows standardising preprocessing of MRI data for further analysis in intelligent diagnostic systems, including machine learning algorithms. The study highlights the importance of combining numerical metrics and expert judgement to develop clinically relevant solutions. And the presented results demonstrate the effectiveness of the proposed method and its potential for use in automated MRI data analysis systems.

Keywords: image quality, MRI images, preprocessing, filtering methods, quality assessment methods.

Kіpіcne. Магнітті-резонансты томография (МРТ) жұмсақ тіңдер мен тірек-қимыл аппаратының ауруларын диагностикалау үшін кеңінен қолданылатын медициналық бейнелеудің ең ақпараттық әдістерінің бірі. Дегенмен, сканерлеу процесінде пайда болатын шудың, артефактілердің және бұрмаланулардың әртүрлі түрлеріне байланысты МРТ кескіндерінің сапасы төмендеуі мүмкін. Бұл нәтижелерді түсіндіруді қиындатады және диагностиканың дәлдігін төмендетеді.

Соңғы жылдары сапасын жақсарту мақсатында МРТ кескіндерін өңдеудің көптеген тәсілдері ұсынылды. Мысалы, Selvakumar және Thangaraju (Selvakumar, Thangaraju, 2023) жұмысында мидың МРТ кескіндерінен шуды кетіру үшін әртүрлі сүзгілерге, соның ішінде ортаңғы, Гаусс, Калман және альфа кесілген ортаңғы сүзгіге салыстырмалы талдау жасалды. Нәтижелер альфа кесілген сүзгі PSNR, SSIM және MSE көрсеткіштері бойынша ең жақсы көрсеткіштерді қамтамасыз ететінін көрсетті. Басқа зерттеу (Doãn, 2022) денейзинг пен аномалияларды окшаулау үшін анизотропты сүзу мен нейрондық желілердің комбинациясын ұсынады. Сондай-ақ, Chung пен бірлескен авторлардың жұмысында (Chung, Kim & Hwang, 2022) шуды азайтуға және МРТ кескіндерінің егжей-

тегжейін жақсартуға, соның ішінде шағын құрылымдарды қалпына келтіруге және айқындылықты жақсартуға мүмкіндік беретін реттелген кері диффузия технологиясы қарастырылған.

Алайда қол жеткізілген табыстарға қарамастан, түрлі дереккөздерден алынған, әр алуан модельдегі МРТ-сканерлерде әрқилы түсіру протоколдары мен параметрлері қолданылған жағдайда бейнелерді сүзгілеу әдістерінің тұрақтылығын арттыруға бағытталған зерттеулер әлі де қажет. Бұл зерттеу дәл осындай әртекті және алуан түрлі деректерді өңдеуге бағытталған.

Бұл зерттеудің жаңалығы сандық көрсеткіштерді (MSE, PSNR, SSIM) және субъективті визуалды сараптаманы қамтитын кешенді тәсілді қолдануда, сондай-ақ Лаплас, Non-Local Means және Unsharp Mask әдістерінің артықшылықтарын біріктіретін біріктірілген сүзгілеу құрылымын әзірлеуде жатыр. Ұсынылған тәсіл визуалды анықтық пен тиімді шуды басу арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етуге мүмкіндік береді, бұл өз кезегінде кескіндерді әрі қарайғы машиналық талдау мен автоматтандырылған диагностикаға дайындау процесінде аса маңызды болып табылады.

Әдеби шолу. Кескіндерді өңдеу және бейнелеу әдістеріндегі соңғы жетістіктер МРТ кескіндерінің сапасын жақсартуға, атап айтқанда шуды азайтуға, артефактілерді жоюға және ажыратымдылықты арттыруға айтарлықтай ықпал етті. Кескін сапасын жақсарту және терең оқыту үшін дәстүрлі көрсеткіштерден бастап әртүрлі тәсілдерді қолдану мениск жаракаттарының әртүрлі түрлерімен байланысты ауруларды дәл диагностикалау және бағалау үшін үлкен әлеуетке ие. Мәселен, (Kastruulin, Zakirov, Pezzotti және Dylov, 2023) жұмысында авторлар магнитті-резонанстық томография, атап айтқанда МРТ кескіндері жағдайында кескін сапасын бағалаудың (IQA) әртүрлі көрсеткіштерінің қолданылу дәрежесі мен тиімділігін талдайды. Зерттеу кескін сапасын бағалаудың эталондық стандартын белгілеу үшін шынайы МРТ скандары бар FastMRI деректер жинағын пайдаланды. Зерттеу барысында SNR (сигнал/шу қатынасы), CNR (контраст/шу қатынасы) және артефактілердің болуы сияқты МРТ кескін сапасын бағалаудың үш негізгі критерийі анықталды. Қабылданған шу деңгейін (SNR) арттыратын әдістер кескіннің анықтығының жақсаруына әкелуі мүмкін. Авторлар SNR жақсартуларын тиімді өлшей алатын көрсеткіштердің қажеттілігі туралы айтады. CNR маңыздылығы және артефактілерді анықтау шуды болдырмау мен контрастты күшейту арасындағы тепе-теңдік үшін жақсартылған алгоритмдерді әзірлеу қажеттілігін көрсетеді, осылайша маңызды ерекшеліктердің жасырылмауын қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, авторлар МРТ-да пайдаланылатын кескін сапасын бағалаудың (IQA) қолданыстағы әдістерінің шектеулі екендігін атап көрсетеді. Осылайша, авторлар МРТ деректерінің бірегей сипаттамаларын дәлірек көрсете алатын арнайы метрикаларды әзірлеу және тексеру қажеттілігін ұсынады. Сондай-ақ, олар кескін сапасын бағалауда МРТ кескіндердің сапасын жақсартуда жақсы нәтиже көрсететін терең оқыту әдістерін қолдануды атап өтеді. (Botnari, Kadar, Patrascu, 2024) жұмысында мениск зақымдарын диагностикалауға бағытталған терең оқыту қолданбаларында МРТ кескіндерінің сапасы мен тиімділігін арттыру үшін қажет алдын ала өңдеу кезеңдері зерттелді. Мақалада 2016 жылдан 2019 жылға дейін алынған тізенің МРТ скандарының деректер жинағы пайдаланылды. МРТ кескіндердің сапасын жақсарту үшін алдын-ала өңдеуді жүзеге асыруда бірнеше кезеңдер қарастырылды: модальды-спецификалық түзетулер, кеңістіктік қайта үлгілеу және өлшемін өзгерту, қарқындылықты қалыпқа келтіру және стандарттау, сондай-ақ шуды басу үшін Гаусс сүзгісі қолданылды. Бұл әдіс кескіннің анықтығын арттырып және МРТ деректерінен белгілерді алуды жақсартады. Авторлар алдын ала өңдеу әдістерін қолдану терең оқыту модельдерінің мениск жыртылуын диагностикалаудағы тиімділігін айтарлықтай арттыратынын мәлімдейді. Келесі жұмыста (Ji Ke, Shufa Wang, Zhao Qiu,

Quan Liu, 2023) мениск зақымдануы бар жіліншік үстіртінің (TPF) сынуын диагностикалаудағы МРТ кескіндері үшін төмен дәрежелі матрицаларға негізделген шуды азайту алгоритмдерінің қабілеттері талданды. Деректер жиынтығы ретінде 2018 жылдың наурызынан 2019 жылдың қазанына дейін диагноз қойылған TPF бар пациенттердің 60 жағдайы таңдалған. Зерттеу авторлары МРТ кескіндеріндегі шуды басу үшін жақсартылған төмен дәрежелі матрицалық факторизацияға (GLRMF) негізделген Гаусс қоспасының жаңа алгоритмін ұсынды. Кескін сапасын талдауды жүзеге асыру үшін әртүрлі шу деңгейлерінде сапаны бағалауға арналған RMSE және SSIM көрсеткіштері пайдаланылды және салыстырылды. Эксперименттік нәтижелер GLRMF алгоритмінің ADF және NLM алгоритмдерімен салыстырғанда, әсіресе модель параметрі $K=100$ болған кезде, құрылымдық тұтастықты (SSIM) жақсы сақтағанын көрсетті. Осылайша, пациенттерді жіктеу нәтижелері Шатцкер диагностикасы бойынша есептелді, ал артроскопия нәтижелері мениск зақымдануы бар TPF диагностикасында МРТ дәлдігін талдау үшін стандарт ретінде пайдаланылды. Модельді бағалау жоғары көрсеткіштерді көрсетті, атап айтқанда сезімталдық 94,76 %, дәлдік 93,33 % және ерекшелік 89 % болды. (Kopovalova және т.б., 2024) мақаласында терең оқытуды (DL) қолдана отырып, кескінді қайта құру сапасы мен аномалияны анықтау тиімділігі арасындағы байланысты қарастырған зерттеулер ұсынылды. Сонымен қатар, рентгенологтардың қалпына келтірілген суреттердегі мениск аномалияларын түсіндіруін жақсарту үшін жасанды интеллект (ЖИ) негізіндегі көмекшінің тиімділігін бағалау жүргізілді. Әдістемде ауытқуларды анықтау үшін 896 пациенттен тұратын деректер жиынтығы қолданылды. Суреттердің сапасын бағалау үшін бағалау көрсеткіштері ретінде стандартты көрсеткіштер қолданылды, атап айтқанда pRMSE, PSNR және SSIM. Авторлар жүргізген салыстырмалы талдау стандартты метрикалар мен олардың ұсынған жаңа box-based метрикаларының арасында айырмашылық бар екенін көрсетті. Авторлардың жаңа бағалау әдісі реконструкцияланған кескіндер сапасын аномалияларды анықтау тұрғысынан дәлірек сипаттауға мүмкіндік беретінін дәлелдеді, бұл дәстүрлі SSIM сияқты метрикалармен салыстырғанда сапаны нақтырақ бағалауды қамтамасыз етеді.

Жалпы алғанда, қазіргі уақытта МРТ кескіндерінің сапасын жақсарту бойынша жүргізілетін зерттеулердің көпшілігі МРТ кескіндерінің сапасын бағалау және жақсарту мақсатында стандартты метрикаларды қолдануға жүгінеді. Сондай-ақ, көптеген ғылыми жұмыстар кескіндердің сапасын жақсартуға және МРТ алу процесін жеделдетуге мүмкіндік беретін жаңа технологиялар мен әдістерді ұсынады. Мұндай технологиялар мен әдістерге параллельді кескін алу, қысу әдістері және терең оқыту алгоритмдері жатады, олар (Altahawi, Aго және Li, 2021) жұмысында егжей-тегжейлі сипатталған. Авторлар 3D МРТ кеңістіктік ажыратымдылығының жоғары болуын атап өтеді, бұл өз кезегінде бұлыңғырлық әсерін азайтып, кескін сапасын айтарлықтай жоғалтпай көп жазықтықты реконструкция жүргізуге мүмкіндік береді. Бұл технология шеміршектердің, менисктердің және тізенің басқа да құрылымдарының күйін сандық тұрғыда бағалау үшін өте қолайлы.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Қазіргі заманғы медициналық визуализация диагностикада жоғары дәлдік пен сенімділікті талап етеді. МРТ кескіндерін талдаудың негізгі кезеңдерінің бірі – алдын ала өңдеу, оның мақсаты – шуды жою және визуалды қабылдауды жақсарту. Осы мақалада кескіндерді өңдеудің әртүрлі әдістері қарастырылып, метрикалар мен визуалды талдау негізінде салыстырмалы талдау жүргізіледі. Талдау негізінде бағалау көрсеткіштері мен кескіннің визуалды анықтығы арасындағы оңтайлы қатынасты қамтамасыз ететін біріктірілген әдіс ұсынылады.

Магниттік-резонанстық томография (МРТ) медицинада кеңінен қолданылады. Алайда алынған кескіндерде жиі шу, артефактілер және басқа да бұрмаланулар болады, бұл диагностикалық сапаны төмендетеді. Кескіндерді алдын ала өңдеу осы кемшіліктерді

жоюға мүмкіндік береді, алайда ең қолайлы әдісті таңдау көптеген факторларға, оның ішінде визуализация режиміне және қолданылған импульстік реттілікке байланысты болады. Бұл зерттеу бірнеше сүзу тәсілдерін сынауға және салыстыруға және кескін сапасының көрсеткіштеріне негізделген оңтайлы әдісті таңдауға бағытталған.

Алдын ала өңдеу процесі төменде 1-суретте көрсетілген келесі кезеңдерден тұрады:

1. Өңдеу әдістерін тестілеу: контрастты жақсарту әдістері, шуды азайту әдістері, айқындықты күшейту және жиектерді бөлектеу әдістері қолданылды.

2. Сапаны бағалау: MSE, PSNR және SSIM метрикалары қолданылды.

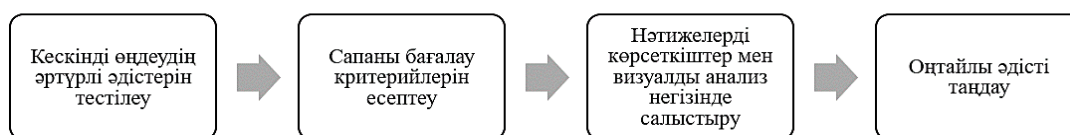
3. Салыстырмалы талдау: нәтижелер сандық түрде (көрсеткіштер арқылы) және визуалды түрде бағаланды.

4. Оңтайлы әдісті таңдау: әр визуализация режимі мен импульстік реттілік үшін бөлек.

Зерттеуде әртүрлі жұмыс принциптері бар бірнеше әдіс топтары пайдаланылды (Santanu, Kanika, Rachit, 2023; Roberto, Hormann, 2022; Anwar et al., 2022; Suryanarayana et al., 2021; Spagnolo et al., 2023). Контрастты арттыру әдістері:

- CLAHE. Кескінді кішігірім аймақтарға бөледі және контрастты күшейтуді шектей отырып, әр аймақта гистограмма теңестіруді орындайды.

- Equalize Hist. Бүкіл кескіннің гистограммасын туралау үшін пиксель жарықтығын жаһандық түрде қайта бөледі.



1-сурет. Кескін сапасын жақсарту процесінің қадамдары

Ескерту – автормен құрастырылған

Шуды басу әдістері:

- Gaussian Blur. Кескінді біркелкі тегістеу, шуды азайту және бөлшектерді басу үшін Гаусс ядросын пайдаланады.

- Median Blur. Пиксель мәнін іргелес пиксель мәндерінің медианасымен алмастырады, "тұз бен бұрыш" түріндегі шуды тиімді басады.

- Bilateral Filter. Кеңістіктік тегістеу мен пиксель қарқындылығының айырмашылықтарын біріктіру арқылы шеттерді сақтау арқылы шуды жояды.

- Non-Local Means Denoising (NLM). Бөлшектерді сақтай отырып, шуды азайту үшін түсі мен құрылымы ұқсас пикселдердің мәндерін орташалайды.

Айқындықты күшейту және жиектерді бөлектеу әдістері:

- Sharpening (Unsharp Mask). Суреттің бұлыңғыр көшірмесін түпнұскадан алып тастау арқылы жиектерді күшейтеді.

- Laplacian Filter. Интенсивтіліктің тез өзгерістерін анықтау үшін екінші ретті туындыны қолдану арқылы жиектерді ерекшелеуге мүмкіндік береді.

- Sobel Filter. Горизонтальды және вертикальды градиенттерге сезімтал сүзгілерді қолдану арқылы жиектерді ерекшелейді.

Осы зерттеуде пайдаланылған кескін сапасын бағалау критерийлері:

Орташа квадраттық қате (MSE). Бастапқы және өңделген кескіндер арасындағы орташа квадраттық ауытқуды өлшейді. 8-биттік кескіндер үшін мән диапазоны 0-ден 65025-ке дейін өзгереді. MSE мәні неғұрлым аз болса, кескіндер арасындағы айырмашылықтар соғұрлым аз болады. Бұл метрика жарықтық өзгерістеріне сезімтал, бірақ құрылымдық айырмашылықтарды көрсете алмайды, сондықтан адамның көру қабылдауымен жақсы үйлесе бермейді.

Пиктік сигнал-шудың қатынасы (pSNR). Бастапқы және өңделген кескіндердің барлық пикселдері арасындағы айырмашылықты бағалай отырып, пиктік сигнал мен орташа квадраттық шу деңгейінің арақатынасын көрсетеді. Қабылданған мәндер диапазоны 0-ден 100-ге дейін, децибелмен логарифмдік шкала бойынша өлшенеді. PSNR жоғары мәндері сапаның жақсы екенін көрсетеді (шудың және бұрмаланулардың аздығы). Бұл метрика жалпы шу деңгейін бағалауға ыңғайлы, бірақ визуалды қабылдауды ескермейді.

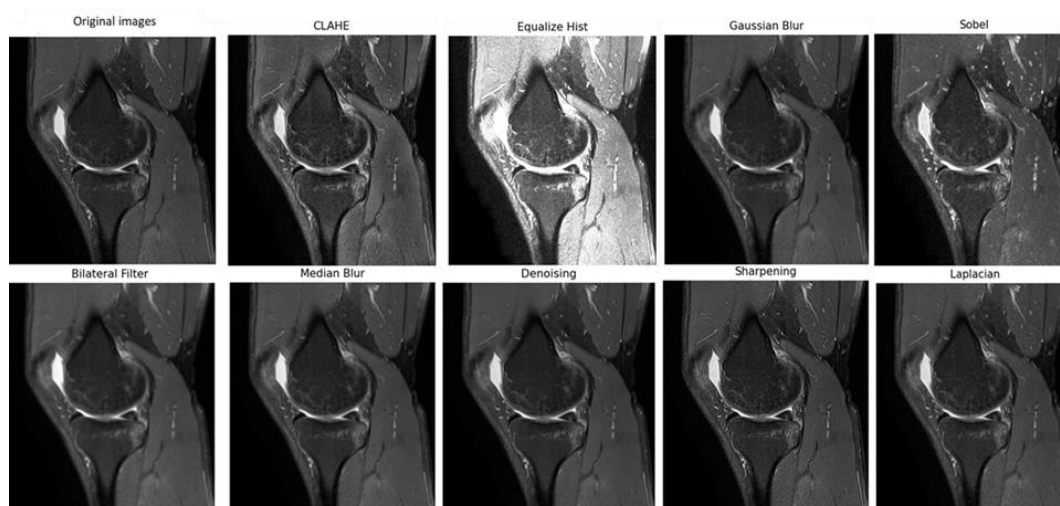
Бұл бағалау әдістері ақ шу бар кескіндер үшін жақсы нәтиже береді. Алайда олар құрылымдық бұрмалануларды дұрыс көрсетпейді.

Құрылымдық ұқсастық өлшемі (SSIM). Жарықтықты, контрастты және текстураны ескере отырып, кескіндер арасындағы құрылымдық ұқсастықты бағалайды. SSIM мәндері 0 мен 1 аралығында болады (1 – толық ұқсастықты білдіреді). Адамның көру жүйесі құрылымды сезінуге қабілетті болғандықтан, SSIM метрикасы сапаны субъективті бағалаумен жақсы үйлеседі.

Әдістерді тестілеу және сапа бағалау критерийлерін есептеу үшін визуализация режимі PD және импульстік реттілігі FS, сондай-ақ визуализация режимдері T1, T2 және импульстік реттіліктері SE, FSE, TSE MPT кескіндері қолданылды.

Нәтижелер және оларды талқылау. Кескін сапасын жақсарту мақсатында таңдалған әдістер әртүрлі визуализация режимдері PD, T2, T1 мен импульстік реттіліктері FS, SE, FSE, TSE бар MPT кескіндерінде тестіленді.

2-суретте таңдалған әдістерді қолдана отырып, PD визуализация режимі және FS импульстік реттілігі бар кескін сапасын өңдеу көрсетілген.



2-сурет. Кескінді әртүрлі әдістермен өңдеу нәтижелері

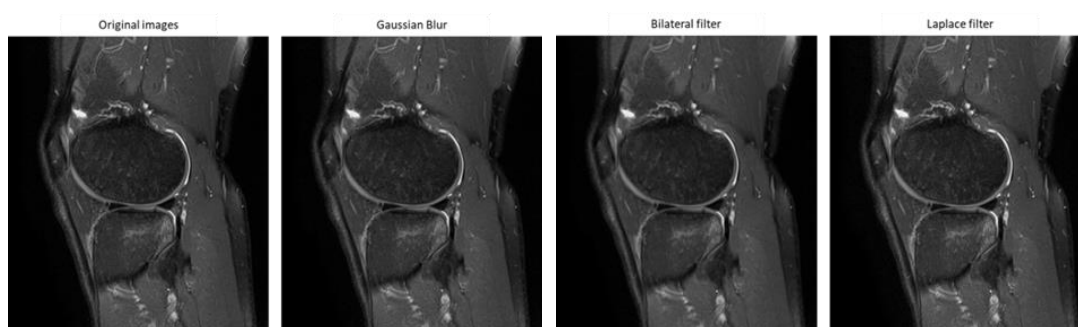
Ескерту – автормен құрастырылған

Кескін сапасын бағалау үшін MSE (орташа квадраттық қате), PSNR (пиктік сигнал-шудың қатынасы) және SSIM (құрылымдық ұқсастық өлшемі) сияқты көрсеткіштер қолданылды.

Көрсеткіштерге негізделген әдістерді салыстыру нәтижелері бойынша Гаусс, Лаплас және Билатералды сүзгілер ең жоғары нәтиже көрсеткені анықталды (3-сурет).

Бірақ визуалды тұрғыда қарастырсақ, бұл әдістер ең жақсы нәтижелерді көрсете бермейді. Салыстыру нәтижесінде әдісті таңдауда сапа көрсеткіштерін де, визуалды талдау нәтижелерін де ескеру қажет деген шешім қабылданды.

Визуалды талдау Гаусс, Билатералды және Лаплас сүзгілерінің жоғары көрсеткіштеріне қарамастан, олар ең жақсы визуалды сапаны қамтамасыз етпейтінін көрсетті. Ең тиімді әдіс ретінде біріктірілген әдіс таңдалды (Vinit Kumar Gunjan, Suganthan, Jan Haase, Amit Kumar, 2020; Pham, 2022; Zenglin Shi et al., 2020).



3-сурет. Гаусс, Билатералды және Лаплас сүзгілерін қолдану нәтижелері
Ескерту – автормен құрастырылған

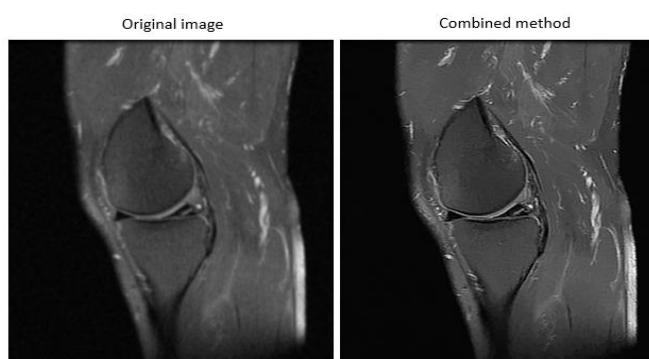
Белгілі бір визуализация режимі мен импульстік реттілігі бар кескіндер жалпы визуалды стильде ұқсас болғандықтан (тіндердің контрасты, майдың басылуы және т.б.), олардың сапасын бір әдіспен өңдеу туралы шешім қабылданды.

Нәтижесінде PD визуализация режимі және FS импульстік реттілігі үшін келесі біріктірілген өңдеу әдісі таңдалды:

1. Laplacian: Лаплас сүзгісін пайдаланып жиектерді бөлектеу және контурларды күшейту.
2. Denoising: Non-Local Means Denoising әдісі арқылы шумды жою.
3. Sharpening: Unsharp Mask фильтрі арқылы айқындықты арттыру.

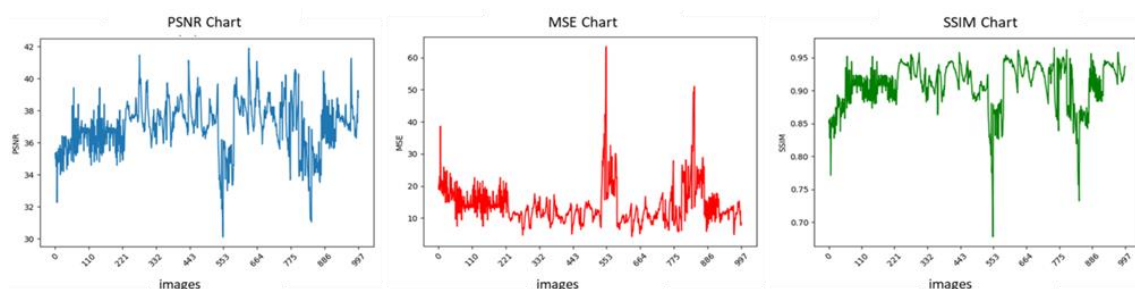
Біріктірілген тәсіл үшін есептеу экспериментінің нәтижесінде оңтайлы сүзу параметрлері анықталды. Non-Local Means Denoising әдісі үшін сүзу шегі $h = 5$, үлгі терезесінің өлшемі $templateWindowSize = 7$ пиксель және іздеу терезесінің өлшемі $searchWindowSize = 21$ пиксель мәндері; Unsharp Mask көмегімен айқындықты арттыру кезінде $\alpha = 0.9$ араластыру коэффициенті; Лаплас сүзгісі үшін кескін тереңдігі CV_64F және бастапқы кескінмен біріктірілген кездегі салмақ: түпнұсқада 1,0 және лапласиан-компонентасында 0,5 қолданылды. Бұл параметрлер шумды азайту, анатомиялық бөлшектерді сақтау және МРТ кескіндерінің визуалды сапасын жақсарту арасындағы тепе-теңдікті қамтамасыз етеді.

Біріктірілген өңдеу әдісінің нәтижесі 4-суретте көрсетілген.



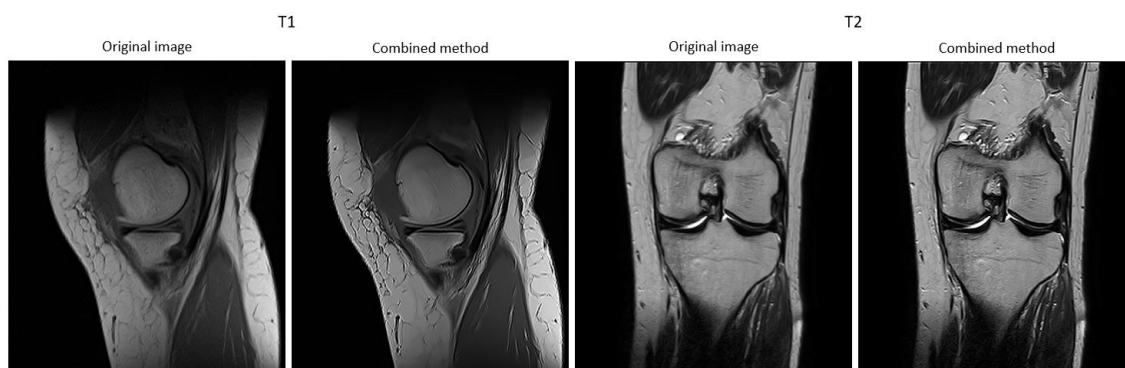
4-сурет. PD режимі үшін біріктірілген өңдеу әдісінің нәтижесі
Ескерту – автормен құрастырылған

5-суретте біріктірілген әдіспен өңделген 997 кескіннің көрсеткіштерінің мәндері берілген.



5-сурет. Біріктірілген әдіспен өңделген кескіндердің сапасын бағалау көрсеткіштері
Ескерту – автормен құрастырылған

Визуализация режимдері – T1, T2, импульстік реттіліктері – SE, FSE, TSE деректері үшін ең жақсы нәтижелер Non-Local Means Denoising әдісімен, әсіресе Unsharp Mask қолданылған кезде алынды. Бұл әдістің нәтижелері төмендегі 6-суретте көрсетілген.



6-сурет. T1, T2 режимдеріне арналған өңдеу әдісінің нәтижелері
Ескерту – автормен құрастырылған

1-кестеде MSE, PSNR және SSIM метрикалық есептеулерінен алынған әзірленген біріктірілген тәсіл мен қолданыстағы әдістердің сандық салыстырмалы сипаттамалары келтірілген. Бұл көрсеткіштер нәтижелердің сапасын объективті бағалауға мүмкіндік береді. Салыстырмалы талдау нәтижесінде көрсеткіштердің ең жақсы мәндерін біріктірілген тәсіл көрсетті (MSE = 32.55; PSNR=41.37; SSIM=0.92), бұл оның MPT кескіндерін өңдеу кезеңіндегі жоғары тиімділігін білдіреді.

1-кесте. Кескін сапасының көрсеткіштері бойынша әдістерді салыстыру

№	Әдістің атауы	MSE	PSNR	SSIM
1	2	3	4	5
1	Біріктірілген тәсіл (Laplacian + NLM + Unsharp Mask)	32.55	41.37	0.92
2	Gaussian Blur	39.47	39.36	0.90
3	Laplacian Filter	39.80	38.21	0.90
4	Bilateral Filter	35.45	39.76	0.86

2-кестенің соңы

1	2	3	4	5
5	Non-Local Means Denoising (NLM)	35.69	39.57	0.86
6	Sharpening (Unsharp Mask)	47.10	35.80	0.85
7	Median Blur	42.20	32.26	0.82
8	CLAHE	132.33	24.47	0.74
9	Sobel Filter	190.83	21.22	0.68
10	Equalize Hist	232.28	9.30	0.44
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>				

Жүргізілген талдау сүзу әдісін таңдауда сандық көрсеткіштермен қатар кескінді субъективті қабылдауды да ескеру қажет екенін көрсетті. PSNR және MSE метрикалары визуалды сапамен әрдайым сәйкес келмейді, ал SSIM ең жоғары сәйкестік көрсетеді. Нәтижесінде, әдістердің біріктірілген жиынтығы әртүрлі клиникалық сценарийлерде жақсы нәтижеге қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Ұсынылған біріктірілген MPT кескіндерді өңдеу әдісі жоғары тиімділікті көрсетеді және медициналық кескіндермен жұмыс істеуде кеңінен қолдануға ұсынылады. Болашақ зерттеулер әдістерді басқа модальді кескіндерге бейімдеуге және сапаны бағалау процесін автоматтандыру үшін нейрондық желілерді енгізуге бағытталуы мүмкін.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу MPT кескіндерін сүзгілеу әдісін таңдауда сапа бойынша сандық метрикаларды (MSE, PSNR, SSIM) және визуалды нәтижені субъективті қабылдауды ескеру қажеттігін көрсетті. Салыстырмалы талдау негізінде құрылымдық айқындық пен шуды басу арасындағы оңтайлы тепе-теңдікті қамтамасыз ететін Лаплас фильтрі, Non-Local Means және Unsharp Mask әдістерін қамтитын біріктірілген әдіс ұсынылды. Алынған нәтижелер кешенді тәсілді қолдану MPT кескіндерінің диагностикалық құндылығын айтарлықтай арттыруға мүмкіндік беретінін растайды. Алдағы уақытта ұсынылған әдістерді басқа визуализация режимдеріне бейімдеу және кескін сапасын бағалау үшін нейрондық желі алгоритмдерін қолдана отырып зерттеуді кеңейту жоспарланған.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс. Бұл зерттеу Қазақстан Республикасы ғылым және жоғары білім министрлігінің ғылым Комитеті тарапынан қаржыландырылды (грант № AP23486396 – «Компьютерлік диагностика міндеттерінде MPT кескіндерінде анатомиялық құрылымдарды тану модельдері мен әдістері»).

Әдебиеттер тізімі

- Selvakumar K., Thangaraju, G. (2023). Comparative study of filters for noise removal in brain MRI images. International Journal of Intelligent Engineering Informatics, 11(1), 1–15. <https://doi.org/10.1504/IJIEI.2023.132703>.
- Doãn, T. B. (2022). Enhancing quality and detecting anomalies in brain MRI images using anisotropic filtering and neural networks. Đại học Đà Lạt Journal of Science, 12(2), 27–42, <https://vjol.info.vn/index.php/TCDHDL/article/view/74010>.
- Chung, H., Kim, K., & Hwang, D. (2022). Denoising and super-resolution of medical images using a regularized reverse diffusion model. arXiv preprint arXiv:2203.12621. <https://arxiv.org/abs/2203.12621>.
- Kasturyulin S., Zakirov J., Pezzotti N. and Dylov D. V. (2023). Image Quality Assessment for Magnetic Resonance Imaging, IEEE Access, vol. 11, pp. 14154-14168, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3243466.
- Botnari A., Kadar M., Patrascu J.M. (2024). Considerations on Image Preprocessing Techniques Required by Deep Learning Models. The Case of the Knee MRIs. Maedica (Bucur). 19(3):526-535. doi: 10.26574/maedica.2024.19.3.526. PMID: 39553362; PMCID: PMC11565144.

- Ji Ke, Shufa Wang, Zhao Qiu, Quan Liu. (2023). Diagnostic evaluation of low-rank matrix denoising algorithm-based magnetic resonance imaging on tibial plateau fracture complicated with meniscus injury. *Expert Syst. J. Knowl. Eng.* 40 (4). <https://doi.org/10.1111/exsy.12858>.
- Konovalova N., Tolpadi A., Liu F., Akkaya Z., Gassert F., Giesler P., Luitjens J., Han M., Bahroos E., Majumdar Sh., Pedoia V. (2024). The object detection method aids in image reconstruction evaluation and clinical interpretation of meniscal abnormalities. *arXiv:2407.12184 [eess.IV]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2407.12184>.
- Altahawi F., Aro G., & Li X. (2021). 3D MRI of the Knee. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 25(3), 455-464. doi:10.1055/s-0041-1730400.
- Santanu Roy, Kanika Bhalla, Rachit Patel (2023). Mathematical analysis of histogram equalization techniques for medical image enhancement: a tutorial from the perspective of data loss. *SSRN Electronic Journal*, <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15799-8>.
- Roberto M. Dyke, Kai Hormann (2022). Histogram equalization using a selective filter. *The Visual Computer* (2023) 39:6221–6235, <https://doi.org/10.1007/s00371-022-02723-8>.
- Anwar Shah, Javed Iqbal Bangash, Abdul Waheed Khan, Imran Ahmed, Abdullah Khan, Asfandiyar Khan, Arshad Khan (2022). Comparative analysis of median filter and its variants for removal of impulse noise from gray scale images. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, Volume 34, Issue 3, March 2022, Pages 505-519, <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.03.007>.
- Suryanarayana G. et al. (2021). Accurate MR Image SR Using Deep Networks and Gaussian Filtering. *IEEE Access Digital Object Identifier* 10.1109/ACCESS.2021.3077611, Volume 9.
- Spagnolo F. et al. (2023). Design of Approximate Bilateral Filters for Image Denoising on FPGAs. *IEEE Access Digital Object Identifier* 10.1109/ACCESS.2022.3233921, Volume 11.
- Vinit Kumar Gunjan, Suganthan P.N., Jan Haase, Amit Kumar (2020). *Cybernetics, Cognition and Machine Learning Applications*, ISSN 2524-7565 ISSN 2524-7573 (electronic) *Algorithms for Intelligent Systems* ISBN 978-981-33-6690-9 ISBN 978-981-33-6691-6 (eBook), <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6691-6>
- Pham T. D. (2022). Kriging-Weighted Laplacian Kernels for Grayscale Image Sharpening. *IEEE Access Digital Object Identifier* 10.1109/ACCESS.2022.3178607, Volume 10.
- Zenglin Shi, Yunlu Chen, Efstratios Gavves, Pascal Mettes, and Cees G. M. Snoek (2020). Unsharp Mask Guided Filtering. *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING*.

Information about authors

Kumarkanova Akbota Serikkyzy – Master of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan, E-mail: akumarkanova@edu.ektu.kz, ORCID: 0000-0003-0517-2445, +7 747 437 10 07

Tankibayeva Akerke Kydyrbekovna – Master of Engineering and Technology, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan, E-mail: atankibaeva@edu.ektu.kz, ORCID: 0009-0007-6053-4775, +7 705 570 39 15

Tlebaldinova Aizhan Soltangalievna – PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan, E-mail: atlebaldinova@edu.ektu.kz, ORCID: 0000-0003-1271-0352, +7 705 752 15 22

Karmenova Marhaba Akhmetollinovna – PhD, S. Amanzholov East Kazakhstan University, Oskemen, Kazakhstan, E-mail: mkarmenova@vku.edu.kz, ORCID: 0000-0002-3028-9461, +7 777 411 04 04

Kumargazhanova Saule Kumargazhanovna – Candidate of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan, E-mail: skumargazhanova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6744-4023, +7 777 183 93 77

АҚПАРАТТЫҚ ЖӘНЕ КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_163
MFTAA 28.23.15

Т. Құрметқан^{1,2}, Ө.Ж. Мамырбаев²,

¹әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы қ., Қазақстан

E-mail: turdybek.narat86@gmail.com*

²Ақпараттық және есептеуіш технологиялар институты, Алматы қ., Қазақстан

E-mail: morkenj@mail.ru

**ҚАЗАҚ СӨЙЛЕУЛЕРІН ТАНУДА TRANSFORMER МОДЕЛІНІҢ
ЖЕТІЛДІРГЕН ТҮРЛЕРІН ҚОЛДАНУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ**

**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСШИРЕННЫХ ФОРМ МОДЕЛИ TRANSFORMER
В РАСПОЗНАВАНИИ КАЗАХСКОЙ РЕЧИ**

**FEATURES OF USING EXTENDED FORMS OF THE TRANSFORMER MODEL
IN KAZAKH SPEECH RECOGNITION**

Аңдатпа. Сөйлеуді тану технологиялары соңғы жылдары жасанды интеллект және машиналық оқыту әдістері негізінде үлкен жетістіктерге жетті. Бұл технологиялар адамның сөйлеуін автоматты түрде түсініп, мәтінге айналдыруға мүмкіндік береді. Машиналық оқыту, терең оқыту әдістері негізінде сөйлеуді тану саласы көптеген ғалымдардың қызығушылығын арттырды. Қазақ сөйлеулерін тану саласы бойынша отандық және шетелдік ғалымдар зерттеу жүргізіп, түрлі модельдерді сынақтан өткізді. Зерттеу нәтижелері бойынша модельдерін ұсынып, қазақ сөйлеулерін автоматты түрде танитын қолданбаларын енгізді. Соған қарамастан қазақ сөйлеулерін тануда деректер қорының аздығы, қазақ тілінің морфологиялық және синтаксистік ерекшеліктеріне байланысты сөйлеуді тануда қиындықтар орын алады. Осыған байланысты қазақ сөйлеулерін тануда сөйлеуді тану дәлдігін арттыру әлі де өзекті. Осы мақсатта мақалада қазақ сөйлеулерін тануда қолданылған автоматты сөйлеуді тану (ASR) модельдері мен олардың нәтижелеріне шолу жасалды. Қазіргі кездегі қазақ сөйлеулерін тану барысындағы кездесетін негізгі мәселер анықталды. Қазақ сөйлеулерін тану мәселелерін шешуге икемді модельдер талданды. Сөйлеуді тануда қолданылатын Hiformer моделі сипатталды. 400 сағаттан тұратын KazASR қазақ тілінің акустикалық-мәтіндік корпусында Transformer, Hiformer, Conformer модельдері оқытылып, тестілеуден өткізілді. Зерттеу нәтижесі бойынша Hiformer моделі қазақ сөйлеулерін тануда ең жоғарғы нәтиже көрсетті. Аталған модель қазақ тілінің ерекшелігіне тура келетінін дәлелдеді. Нақты айтқанда, 400 сағаттық акустикалық-мәтіндік корпус үшін Conformer моделінде сөз қатесі (wer) 12.9 %-ға дейін төмендесе, Hiformer моделінде сөз қатесі 11.6 %-ға дейін төмендеді.

Түйін сөздер: Автоматты сөйлеуді тану, Hiformer, Conformer, Transformer, конволюциялық нейрондық желі, терең оқыту, қазақ сөйлеулерін тану

Аннотация. В последние годы технологии распознавания речи значительно продвинулись благодаря методам искусственного интеллекта и машинного обучения. Эти технологии позволяют автоматически воспринимать человеческую речь и преобразовывать её в текст. Область распознавания речи, основанная на методах машинного и глубокого обучения, привлекла значительное внимание исследователей по всему миру. Как отечественные, так и зарубежные ученые провели исследования по распознаванию казахской речи, протестировали различные модели и предложили решения для автоматического распознавания. Несмотря на достигнутый прогресс, распознавание казахской речи по-прежнему сталкивается с рядом сложностей, обусловленных ограниченной доступностью крупномасштабных корпусов данных, а также морфологическими и синтаксическими особенностями казахского языка. В связи с этим повышение точности распознавания остаётся актуальной задачей. В данной работе проведён обзор моделей автоматического распознавания речи (ASR), применяемых для казахской речи, и их результатов. Были выявлены основные проблемы, возникающие в процессе распознавания, а

также проанализированы гибкие модели, предлагаемые для их решения. В исследовании рассматривается модель CHiformer в контексте распознавания речи, а также оценивается производительность моделей Transformer, Hiformer и Conformer, обученных на 400-часовом казахском акустико-текстовом корпусе KazASR. Результаты показали, что модель Hiformer достигла наивысшей точности в распознавании казахской речи, что подтверждает её соответствие языковым особенностям казахского языка. В частности, для 400-часового корпуса уровень ошибок слов (WER) модели Conformer снизился до 12,9 %, тогда как у модели Hiformer этот показатель составил 11,6 %.

Ключевые слова: автоматическое распознавание речи, преобразователь, Conformer, Hiformer, сверточная нейронная сеть, глубокое обучение, распознавание казахской речи.

Annotation. In recent years, speech recognition technologies have significantly advanced due to artificial intelligence and machine learning methods. These technologies enable the automatic understanding of human speech and its conversion into text. The field of speech recognition, driven by machine learning and deep learning techniques, has garnered substantial interest from researchers worldwide. Both domestic and international scientists have conducted studies on Kazakh speech recognition, testing various models and proposing solutions for automatic recognition. Despite these advancements, Kazakh speech recognition still faces challenges due to the limited availability of large-scale datasets and the morphological and syntactic complexity of the Kazakh language. Consequently, improving recognition accuracy remains a relevant research area. This study provides a comprehensive review of the automatic speech recognition (ASR) models applied to Kazakh speech and their performance outcomes. Key challenges in the current Kazakh speech recognition process were identified, and flexible models for addressing these challenges were analyzed. The study examines the CHiformer model in speech recognition and evaluates the performance of Transformer, Hiformer, and Conformer models trained on the 400-hour KazASR Kazakh acoustic-text corpus. The results indicate that the Hiformer model achieved the highest accuracy in recognizing Kazakh speech, demonstrating its suitability for the linguistic characteristics of the Kazakh language. Specifically, for the 400-hour corpus, the word error rate (WER) of the Conformer model was reduced to 12.9%, while the WER of the Hiformer model further decreased to 11.6%.

Keywords: automatic speech recognition, converter, Conformer, Hiformer, convolutional neural network, deep learning, Kazakh speech recognition.

Kіpіcne. Автоматты сөйлеуді тану жүйелері жасанды интеллект саласының дамуымен бірге қалыптасты. Дәстүрлі сөйлеуді тану модельдері бастапқыда Леуренс Робимер негізін қалаған жасырын Марков желілеріне сүйенді. Одан бөлек сөйлеуді тануға Гаусс қоспалары модельдері, шешім ағаштары, К жақын көршілер әдістері қолданылды (A Vaswani, et al., 2017). Терең нейрондық желілер шыққанда көптеген ASR архитектуралары пайда болды (Oralbekova D., et al., 2022). Сөйлеуді тану жүйелерін құруда терең оқытудың конволюциялық нейрондық желілері (CNN) (Dauphin Y., et al., 2017), қайталанатын нейрондық желілер (RNN), қарсылықты желілер (GAN) жиі қолданылады. Бұл желілерге қарағанда соңғы кезде трансформер архитектурасы сөйлеуді тануда жоғары көрсеткіштерге қол жеткізді (Gulati A., et al., 2021, Choi H., et al., 2021).

Сөйлеуді тану жүйелері көптеген салаларда, оның ішінде мобильдік қосымшаларда, дауыстық көмекшілерде, медициналық диагностикада, білім беру және құқық қорғау салаларында кеңінен қолданылуда. Алайда, әлемдік медиада ресурсы аз тілдер үшін сөйлеуді тану технологияларын қолдану белгілі бір қиындықтар туғызады.

Зерттеу объектіміз болып отырған қазақ тілі – Қазақстан Республикасының мемлекеттік тілі, Қазақстан, Ресей, Өзбекстан, Қытай, Моңғолия сияқты бірнеше мемлекетте 20 миллионға жуық қолданушысы бар түрік тілдерінің бірі. Трансформер сияқты архитектуралардың пайда болуы қазақ сөйлеулерін тануда жоғары көрсеткішке жеткенімен, қазақ тілі үшін деректер базалары әлі де аз. Қазақ тілінің агглютинативті тілдер тобына жататыны, тілдің үндестік заңы мен дауысты дыбыстардың үйлесуі сөйлеуді тану модельдеріне қосымша қиындық туғызады (Mamyrbayev O., et al., 2021). Бұл мақалада Transformer моделінің жетілдірген түрлерін қазақ тілі корпусында сынақтан өтікізіп, зерттеу нәтижемізді жариялаймыз.

Әдеби шолу. Қазақ тілі агглютинативті тілдер қатарына жатады, яғни сөздерге түрлі қосымшалар жалғану арқылы жаңа сөздер мен мағыналар жасалады. Бұл сөйлеуді тану жүйелеріне айтарлықтай қиындық тудырады, себебі жалғанымдар саны өте көп және сөйлемдегі сөздердің морфологиялық құрылымы күрделі. Қазақ сөйлеулерін тануда кездесетін осы мәселелерді шешу жолында көптеген ғалымдар еңбек етіп, түрлі модельдерді зерттеді. «Терең нейрондық желілер арқылы қазақ тілін автоматты тану» атты еңбекте дәстүрлі нейрондық желілерге қарағанда 6 қабаттан тұратын терең нейрондық желі жоғары көрсеткішке жетті (Mamyrbayev O., et al., 2019). Трансферлік оқытуды пайдалана отырып, қазақ сөйлеулерін автоматты тану жүйесін әзірлеуде LSTM және BiLSTM нейрондық желілерді қолданды. Сыртқы модель ретінде орыс тілінің корпусын пайдаланған. Осы арқылы қазақ тіліндегі корпусның жетіспеушілігін азайтқан (Kozhirkbayev Zh., & Islamgozhayev T., 2023). Зерттеушілер Wav2vec2.0 моделін жетілдіріп қазақ тіліне қолдану нәтижесіне, wav2vec-F моделін ұсынды (Baevski A., et al., 2020). Трансформерлік және коннекционистік уақытша жіктеу модельдерін бірлесіп қолдану қазақ тілінің тану жүйесінің өнімділігін арттырды (Mamyrbayev O., et al., 2023). Niformer моделін қазақ сөйлеулерін тануда қолдану әртүрлі деңгей арасындағы байланысты жақсартты (Ө.Ж. Мамырбаев, Т. Құрметқан, 2024). Көптілді автоматты сөйлеуді тану жүйелері де қазақ тілі үшін тиімді нәтиже көрсетті (Bekarystankyzy A., et al., 2024). Көп тілді end-to-end ASR моделін түркі тілдерінің (қазақ, башқұрт, қырғыз, саха, татар) ортақ алфавиттері мен морфологиялық ұқсастықтарын қолдана отырып, ESPnet негізінде түрік тілдерінің көптілді оқыту жүйесі әзірленді. Бұл әдіс қазақ тілі үшін сөз қатесі деңгейін (WER) екі есе, әріп қатесі деңгейін 3 есеге дейін төмендетті. Қазақ тілі үшін жоғары ресурсты тілдерде алдын ала оқытылған модельдерді қолдану нәтижесінде сөз және әріп қателері айтарлықтай азайғаны байқалған (Bekarystankyzy A., et al., 2024). Сонымен қатар, WaveNet-CTC моделін қолдану көп тапсырмалы сөйлеуді тану жүйесі үшін жаңа әдіс ретінде ұсынылды (Narejo K., et al., 2024). Нәтижесінде, қазақ тілінің диалектілеріне арналған жүйелердің дәлдігі артты. Қарастырған зерттеулер қазақ тілін автоматты тануда көптілді және көпміндетті тәсілдердің тиімділігін дәлелдеп, қазақ тілінде сөйлеуді тану жүйесінің өнімділігін арттыруға бағытталған жаңа әдістерді ұсынады. Осы сияқты зерттеулерге қарамастан қазақ сөйлеулерін танудың негізгі мәселелерін зерттеу және оны шешу өзектілігін жоғалтпайды.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Соңғы жылдары Transformer архитектурасына негізделген модельдер сөйлеуді тану және өңдеу салаларында үлкен жетістіктерге жетті. Transformer модельдерінің ерекшелігі – олардың үлкен көлемді мәтіндермен және күрделі тілдік құрылымдармен тиімді жұмыс істей алуында (Wang Q., et al., 2016). Бұл модельдер әсіресе машиналық аударма, табиғи тілдерді өңдеу және сөйлеуді тану жүйелерінде кеңінен қолданылады. Қазақ тілі үшін де трансформер негізіндегі модельдер үлкен мүмкіндіктерге ие, алайда оларды қолдану барысында белгілі бір ерекшеліктер мен қиындықтар туындауы мүмкін (Mamyrbayev O., et al., 2021).

Transformer моделін алғашқы рет 2017 жылы Google зерттеушілері ұсынған және бұл архитектурада көпқабатты өзіне назар аудару механизмдері (multi-head self-attention) қолданылады. Transformer моделінің негізгі компоненттері:

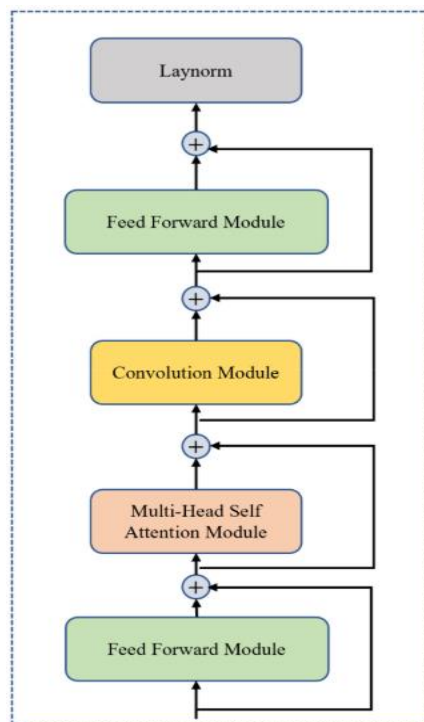
- Encoder-Decoder архитектурасы: Encoder мәтінді өңдеп, оның ішкі көрінісін жасайды, ал Decoder бұл көріністерді мәтінге немесе сөйлеуге айналдырады.

- Self-Attention механизмдері: Бұл механизм әрбір сөзді немесе сөз тіркесін бүкіл контекст бойынша салыстырады және сөйлеудің әрбір бөлігінің мағынасын анықтауға көмектеседі (Nguyen T. & Salazar J., 2019).

– Position Embeddings: Мәтін ішіндегі сөздердің орналасу тәртібін сақтау үшін трансформер модельдері позициялық кодтауды қолданады, себебі нейрондық желілер мәтіндегі сөздердің ретін тікелей ескеріп жұмыс істемейді.

Қазақ тілінің күрделі морфологиялық құрылымын тану үшін Transformer модельдерінің өзіне назар аудару қабілеті өте тиімді. Transformer модельдері контексті түсіну үшін сөйлемдегі әрбір сөздің мағынасын басқа сөздермен салыстыра отырып, олардың өзара байланысын анықтайды.

Conformer моделінің архитектурасы. Conformer моделі сөйлеуді тану жүйелерінде кеңінен қолданылатын архитектуралардың бірі. Бұл модель 1-суреттегідей төрт негізгі модульден тұрады: алға жылжыту модулі, өзіне назар аудару модулі, конволюция модулі және тағы бір алға жылжыту модулі. Conformer архитектурасы Transformer моделіндегі назар аудару механизмдерін пайдаланады, бұл модельге ұзақ мерзімді тәуелділіктерді тиімді түрде меңгеруге мүмкіндік береді. Өзіне назар аудару модулі сөйлеудің әртүрлі бөліктері арасындағы байланысты анықтауға көмектеседі және контекстік мағынаны тереңірек түсіндіреді. Сонымен қатар, Conformer модуліндегі конволюциялық қабаттар деректердің құрылымдық ерекшеліктерін меңгеруге және қысқа мерзімді тәуелділіктерді үйренуге мүмкіндік береді. Бұл қабаттар сөйлеу сигналдарындағы фонетикалық өзгерістерді тиімді түрде өңдейді (Gulati A., et al., 2021).

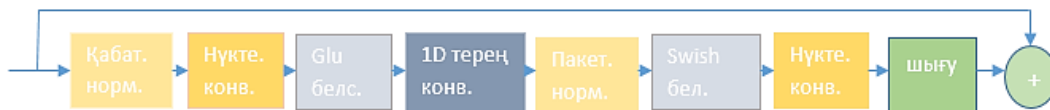


1-сурет. Conformer моделінің архитектурасы

Ескерту – (Gulati A., et al., 2021) негізінде құрастырылған

Көп басты өзіне назар аудару модулі. Conformer моделінде көп басты назар аудару (multi-head attention) механизмі маңызды рөл атқарады. Бұл модуль деректердің ішкі байланыстарын терең түсінуге мүмкіндік береді. Көп басты назар аудару механизмі әртүрлі ақпарат түрлеріне назар аудару арқылы сөйлеудің әр қырын зерттеуге жағдай жасайды (Gulati A., et al., 2021).

Конволюция модулі. Conformer моделіндегі конволюция модулі бірнеше маңызды компоненттерден тұрады: шығыс механизмі, бір өлшемді тереңдік бойынша конволюция қабаты және партиялық нормализация. Бұл модуль жергілікті ерекшеліктерді тануға және сөйлеу үлгілерін тиімді түрде өңдеуге көмектеседі. Тереңдік бойынша конволюция әр арнадан ерекшеліктерді жинақтап, модельдің ақпаратты дәл өңдеу қабілетін арттырады. Сонымен қатар, партиялық нормализация оқыту процесінің тұрақтылығын қамтамасыз етеді және модельдің жылдам үйренуіне ықпал етеді. Конволюция блоктары 2-суретте көрсетілген (Ө.Ж. Мармырбаев, Т. Құрметқан & R.S. Arslan. 2024).



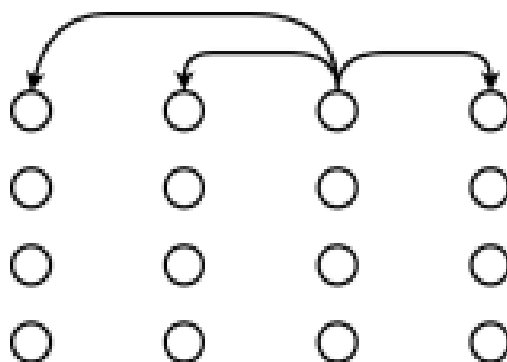
2-сурет. Конволюция модулі

Ескерту – автормен құрастырылған

Алға жылжыту модулі. Transformer архитектурасында көп басты назар аудару (MHSA) қабатынан кейін алға жылжыту модулі (Feed Forward Module) қолданылады. Бұл модуль екі сызықтық түрлендіруден және олардың арасында бейсызықты белсендіру функциясынан тұрады. Оның басты мақсаты – желінің өңдеу қабілетін күшейту және күрделі ерекшеліктерді үйрену. Қосымша қалдық байланыс қабаттары модельдің оқыту тұрақтылығын қамтамасыз етеді және ақпараттың жоғалуын азайтады. Бұл механизм градиенттердің жойылу мәселесін шешуге де көмектеседі.

Hiformer моделі – сөйлеуді тануда қолданылатын трансформер архитектурасының жетілдірілген нұсқасы. Бұл модель аудио сигналдарын өңдеп, оларды мәтінге айналдыру кезінде жоғары деңгейлі контекстік талдау мен әртүрлі ақпарат көздерін біріктіру қабілетіне ие. Модель негізінен сөйлеуді сегментациялау, дыбыстарды анықтау, фонетикалық ерекшеліктерді тану және сөйлем мағынасын дұрыс түсіну үшін қолданылады (Mamyrbayev O., et al., 2024).

Hiformer архитектурасы. Стандартты трансформерде қолданылғандай Hiformer моделінің өзіне назар аудару механизмі 3-суреттегідей бір қабаттағы қадамдардың әрбір жұбы арасындағы корреляцияны түсіру үшін пайдаланылады. Сұраныстар жиынтығы негізінде трансформердің 1-ші қабатындағы назар аудару функциясын есептеу 1-формулада бейнеленген. S – сұраныстар, k – кілттік мәндер, m – сәйкес мәндер (Xixin Wu, et al., 2023).



3-сурет. Өзіне назар аудару механизмі

Ескерту – (Xixin Wu., et al., 2023) негізінде құрастырылған

$$FS^{(l)} = \text{softmax}(d_k^{-\frac{1}{2}} s^{(l)} k^{(l)} m^{(l)T}) m^l \quad (1)$$

мұндағы $s^{(l)} \in R^{T \times d_k}$, $k^{(l)} \in R^{T \times d_k}$, $m^{(l)} \in R^{T \times d_k}$, сұраныстар, кілттер және мәндер ретінде қабылданады. Бұл әдіс әр қабаттағы ақпаратты біріктірмей, тек бір деңгейдегі тәуелділіктерді зерттейді.

Көп деңгейлі назар аудару механизмі сұраныстарды, кілттерді және мәндерді алу үшін параллель проекцияларды қолдану арқылы өзіне назар аудару өнімділігін арттырады. Бұл процесс (1) теңдеуде көрсетілгендей назар аудару шығыстарын бөлек есептеуге мүмкіндік береді.

$$FS_{\text{sh}}^{(l)} = \text{concat}(FS_1^{(l)}, \dots, FS_1^{(l)}) W^{Fs} \quad (2)$$

Бұл әдіс көп деңгейлі байланыстарды зерттеуге және әртүрлі өлшемдер бойынша өңдеуді жақсартуға мүмкіндік береді.

Қазақ тілінің ерекшеліктерін тану. Қазақ тілі агглютинативті тілдер қатарына жатады, яғни сөздерге жалғаулар мен жұрнақтар қосылып, жаңа сөздер мен мағыналар пайда болады. Сондай-ақ, қазақ тілінде дауыссыз дыбыстардың үндестік заңы бойынша өзгеруі жиі кездеседі. Niformer моделі қазақ тіліне тән осы ерекшеліктерді тиімді тануға мүмкіндік береді:

- Сөздің өзгермелі формаларын тану: модель сөз түбірін және оған қосылған аффикстерді ажырата отырып, сөздің мағынасын дұрыс түсінеді.

- Үндестік заңы: Niformer қазақ тіліндегі дыбыстардың бір-біріне ықпал етуін және сөздің айтылу формасын дұрыс талдай алады. Мысалы, сөздің соңғы дыбысы дауысты немесе дауыссыз болса, жалғаудың өзгеруі мүмкін және модель осы фонетикалық заңдылықтарды ескере отырып тану жасайды.

Нәтижелер және оны талқылау. Conformer және Niformer моделдері арқылы қазақ сөйлеулерін тану үшін ҚР ҒжЖБМ ҒК «Ақпараттық және есептеу технологиялары институты» РМК құрастырған қазақ тілінің 400 сағаттық сөйлеу корпусы пайдаланылды. Модельдерді үйрету үшін сөйлеу корпусын 200 сағат «таза» сөйлеу және 200 сағат спонтанды телефонмен сөйлеу корпусынан тұрды. Корпуста дыбыстық файлдар оқу және сынақ бөліктеріне бөлінді. Сөйлеу корпусы әртүрлі жастағы және жыныстағы 380 қазақ тілді диктордың оқуындағы жазбалардан, көркем кітаптарды оқу деректерінен және жаңалықтар мазмұнын қамтыды.

Телефондағы сөйлесушілердің жазбалары арнайы зерттеу жұмыстарымыз үшін телекоммуникация компаниялардан сұрап алынған. Телефонмен сөйлесулерді транскрипциялау мәтіндерді құрастырудың әзірленген әдістемесі негізінде жүзеге асырылды, өйткені бұл сөйлеу стихиялы және шет тіліндегі ақпараттың араласуы мен түрлі шулардан дыбыстың анық болмауы мүмкін (Mamyrbayev O., et al., 2024).

Conformer моделінде кодер үшін 12 конформер блогы және декодер үшін 6 трансформер қабаты бар. Блок өлшемі 2048, ал өзіне назар аудару модульдерінде 4 бас бар. Niformer моделін құру үшін Conformer-ге жоғары назар аудару механизмін енгіземіз. Niformer моделін конфигурациясы жоғары назар аудару модулін енгізуді және назар аударуды жоғалту жылдамдығын 0-ден 0,1-ге дейін арттырамыз. Жоғары назар аудару тәжірибелерде кеңейту коэффициенті 1 болатын екі тарихи қабатты қарастырады. Niformer моделінде де кодер үшін 12, декодер үшін 6 трансформер қабаты қолданылды. Блок өлшемі 2048, ал өзіне назар аудару модульдерінде 4 бас бар. Бұл модельдер екі түрлі корпус үшін де бірдей қолданылды. Модельдерін көрсеткіштері үшін символдық қатені (CER) және сөз қатесін (CER) анықтау арқылы бағаланды.

1-кестеде көрсетілгендей Conformer моделі Transformer және CNN модельдерінің көрсеткіштеріне қарағанда жақсы көрсеткішке жеткенін байқауға болады. Сынақ таза жинақтағы Conformer моделі Transformer моделінен WER 1,3 % төмен екенін және CER 0,9 %, CNN моделінен қателік 3 пайызға жуық төмен нәтиже көрсетті. Hiformer моделі Conformer моделінен WER 1,3 % төмен екенін және CER 0,6 % төмен нәтиже көрсеткенін көреміз.

1-кесте. Студияда жазылған сөйлеу корпусына модельдерді қолдану нәтижесі

Модель	CER	WER
CNN	9.8	17.5
Transformer	7.9	14.2
Conformer	7.1	12.9
Hiformer	6.5	11.6
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>		

2-кестеде көрсетілгендей телефон сөйлесулері арқылы жазылған сөйлеу корпусына да Conformer моделі Transformer және CNN модельдерінен анақұрлым жоғары нәтиже көрсетсе, жоғары назар аудару механизмі бар Hiformer моделі Transformer және Conformer модельдерімен салыстырғанда тиімді екенін көрсетеді.

2-кесте. Телефон сөйлесулері арқылы жазылған сөйлеу корпусына модельдерді қолданудың нәтижесі

Модель	CER	WER
CNN	17.4	24.3
Transformer	14.8	21.1
Conformer	11.6	17.8
Hiformer	9.5	15.2
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>		

Зерттеу нәтижелерімізге қарай отырып, Hiformer моделінің қазақ сөйлеулерін тануда бірқатар артықшылықтары анықталды:

Трансформердің контекстік мүмкіндіктері: модельдің трансформер архитектурасы сөйлеу барысында әрбір сөздің контекстін талдай отырып, сөздер арасындағы байланысты жақсырақ анықтайды. Бұл әсіресе көпмағыналы сөздерді дұрыс түсінуге көмектеседі.

Ұзын және күрделі сөйлемдерді тану: Hiformer моделі ұзақ сөйлемдер мен күрделі синтаксистік құрылымдарды тиімді өңдейді. Қазақ тілінде бір сөйлемде бірнеше жалғау мен жұрнақ қолданыла алады, сондықтан модель бұл құрылымдарды дұрыс талдап, сөйлемнің толық мағынасын түсінеді.

Табиғи шу мен акцентті тану: телефон сөйлесулері арқылы жазылған сөйлеу корпусына модельдерді қолдану нәтижесіне қарай отырып, модель аудио сапасының төмендеуі немесе сөйлеушінің акценті болған жағдайда да сөйлеуді тануға бейімделеді. Мысалы, түрлі аймақтардағы диалектілер мен акценттерді ескеріп, негізгі сөйлеу мазмұнын нақтылап береді.

Қорытынды. Автоматты сөйлеуді тану жүйелерін құруда терең оқытудың конволюциялық нейрондық желілері (CNN) мен трансформер нейрондық желілері жоғары көрсеткіштерге ие. Деседе бұл екі модельдің өзіндік артықшылықтарымен бірге кемшіліктері де болды. Осының негізінде трансформер архитектурасының жетілдірген жаңа модельдері пайда болды. Зерттеу жұмысымызда трансформер және конволюциялық нейрондық желілердің артықшылықтарын өзара сәйкестірген Conformer моделі мен деңгейаралық және кросс-кодерлік иерархиялық ақпаратты қарастыратын иерархиялық назар аудару механизміне ие Hiformer модельдерін Қазақ тілі корпусында сынақтан өткізіп, тиімділігін көрдік. Conformer моделі қазақ сөйлеулерін тануға CNN және Transformer модельдерінен жоғары көрсеткіш көрсетсе, ал Hiformer моделі ең жоғарғы нәтиже беріп, аталған модельдер қазақ тілінің морфологиялық және синтаксистік ерекшеліктеріне байланысты мәселелерді шешуге бейім екенін көрсетті. Аталған модельдер қазақ тілінде сөйлеуді тану қосымшалары үшін қолдануға болатыны дәлелденді. Алдағы уақытта сөйлеу корпусын арттыру арқылы Hiformer моделінің нәтижесін одан да жоғарылатуды мақсат етеміз. Сондай-ақ, Conformer моделін қазақ тіліне қайта бейімдеу (Fine Tuning) әдістерін қарастыратын боламыз.

Алғыс. Бұл жұмыс Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігі тарапынан BR24993001 «Қазақ тілі мен технологиялық прогресті қолдау үшін үлкен тілдік моделін (LLM) құру» жобасы негізінде қолдау тапты.

Әдебиеттер тізімі

- A. Vaswani, N., Shazeer, N., Parmar, J., Uszkoreit, L., Jones, A., Gomez, Ł., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. In Proceedings of NeurIPS. Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017) . DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
- Oralbekova, D., Mamyrbayev, O., Othman, M., Alimhan, K., Zhumazhanov, B., & Nuranbayeva, B. (2022). Development of CRF and CTC Based End-To-End Kazakh Speech Recognition System. In Nguyen, N.T., Tran, T.K., Tukayev, U., Hong, T.P., Trawiński, B., & Szczerbicki, E. (Eds.), Intelligent Information and Database Systems. ACIIDS 2022. Lecture Notes in Computer Science (Vol. 13757). Springer, Cham.
- Dauphin, Y. N., Fan, A., Auli, M., & Grangier, D. (2017). Language modeling with gated convolutional networks. In Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning (Vol. 70, pp. 933–941). JMLR.org.
- Choi, H., Lee, J., Kim, W., Lee, J., Heo, H., & Lee, K. (2021). Neural analysis and synthesis: Reconstructing speech from self-supervised representations. In Proceedings of NeurIPS.
- Mamyrbayev, O., Oralbekova, D., Alimhan, K., Turdalykyzy, T., & Othman, M. (2022). A study of transformer-based end-to-end speech recognition system for Kazakh language. In Proceedings of Springer Nature.
- Gulati, A., Qin, J., Chiu, C.-C., Parmar, N., Zhang, Y., Yu, J., Han, W., Wang, S., Zhang, Z., Wu, Y., & Pang, R. (2020). Conformer: Convolution-augmented Transformer for Speech Recognition. Submitted to Interspeech 2020.
- Mamyrbayev, O., Turdalyuly, M., Mekebayev, N., Alimhan, K., Kydyrbekova, A., & Turdalykyzy, T. (2019). Automatic Recognition of Kazakh Speech Using Deep Neural Networks. In ACIIDS, Lecture Notes in Computer Science (pp. 465–474).
- Kozhirbayev, Zh., & Islamgozhayev, T. (2023). Cascade Speech Translation for the Kazakh Language. Applied Sciences.
- Baevski, A., Zhou, Y., Mohamed, A., & Auli, M. (2020). wav2vec 2.0: A framework for self-supervised learning of speech representations. Advances in Neural Information Processing Systems, 33, 12449–12460.

- Mamyrbayev, O., Pavlov, S., Bekarystankyzy, A., Oralbekova, D., Zhumazhanov, B., Azarova, L., Mussayeva, D., Koval, T., Gromaszek, K., Issimov, N., & Shiyapov, K. (2023). Neurorecognition visualization in multitask end-to-end speech. In Proceedings of SPIE, 12985, Optical Fibers and Their Applications 2023.
- Mamyrbayev, O., Kurmetkan, T., Oralbekova, D., & Zhumazhan, N. (2024). A Study of Kazakh Speech Recognition in Hiformer Model. In Recent Challenges in Intelligent Information and Database Systems. ACIIDS 2024 (pp. 330–340).
- Bekarystankyzy, A., Mamyrbayev, O., & Anarbekova, T. (2024). Integrated End-to-End Automatic Speech Recognition for Agglutinative Languages. ACM Transactions on Asian and Low-Resource Language Information Processing (TALIP).
- Bekarystankyzy, A., Mamyrbayev, O., Mendes, M., Fazylyzhanova, A., & Assam, M. (2024). Multilingual end-to-end ASR for low-resource Turkic languages with common alphabets. Scientific Reports, 14, 13835.
- Xixin Wu, Hui Lu, Kun Li, Zhiyong Wu, Xunying Liu, Helen Meng (2023). Hiformer: Sequence Modeling Networks with Hierarchical Attention Mechanisms. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASLP.2023.3313428>
- Chan, W., Jaitly, N., Le, Q., & Vinyals, O. (2016). Listen, attend and spell: A neural network for large vocabulary conversational speech recognition. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 20–25 March 2016.
- Wang, Q., Li, B., Xiao, T., Zhu, J., Li, C., Wong, D. F., & Chao, L. S. (2019). Learning deep transformer models for machine translation. In Proceedings of the 57th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (pp. 1810–1822). Association for Computational Linguistics.
- Narejo, K. R., Zan, H., Oralbekova, D., Dharmani, K. P., Orken, M., & Mukhsina, K. (2024). Enhancing Emoji-Based Sentiment Classification in Urdu Tweets: Fusion Strategies With Multilingual BERT and Emoji Embeddings. IEEE Access, 12, 126587-126600. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3446897.
- Mamyrbayev, O., Oralbekova, D., Kydyrbekova, A., Turdalykyzy, T., & Bekarystankyzy, A. (2021). End-to-End Model Based on RNN-T for Kazakh Speech Recognition. In 2021 3rd International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI).
- Ө.Ж. Мармырбаев, *Т. Құрметқан, R.S. Arslan. "Қазақ сөйлеулерін тануда Conformer моделін қолдану." Қазақстан Республикасы Ұлттық инженерлік академиясының хабаршысы, 2024, № 3 (93), 144-154-беттер. DOI: <https://doi.org/10.47533/2024.1606-146X.57>.
- Ө.Ж. Мармырбаев, *Т. Құрметқан. "Қазақ сөйлеулерін тануға Hiformer моделін қолдануды талдау" Қазақстан Республикасы Ұлттық инженерлік академиясының хабаршысы, 2024, № 4 (94), 290-300-беттер. DOI: <https://doi.org/10.47533/2024.1606-146X.024>.
- Nguyen, T. & Salazar, J. (2019). Transformers without tears: Improving the normalization of self-attention. arXiv preprint arXiv:1910.05895.

Information about authors

Turdybek Kurmetkan – PhD student, Institute of Information and Computational Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: turdybek.narat86@gmail.com, Tel: 8771458887153

Mamyrbayev Orken Zhumazhanovich – PhD, Professor, Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan. E-mail: morkenj@mail.ru, Tel: +7 777 366 2727

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ ЖӘНЕ МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ
ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_172
IRSTI 20.53.23

D.V. Lopatkin¹, N.P. Rokhas Kriulko², I.A. Kotlyarova³, G.V. Popova⁴, Y.A. Vais⁵

D. Serikbayev East-Kazakhstan Technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

¹E-mail: lopatkin.d@edu.ektu.kz

²E-mail: nrohas@edu.ektu.kz*

³E-mail: IKotlyarova@edu.ektu.kz

⁴E-mail: gpopova@edu.ektu.kz

⁵E-mail: YuVais@edu.ektu.kz

**ADVANCES IN AUTOMATIC QUESTION GENERATION:
A SURVEY OF AUTOMATIC QUESTION GENERATION TECHNIQUES,
DATASETS, AND EVALUATION**

**СҰРАҚТАРДЫ АВТОМАТТЫ ТҮРДЕ ГЕНЕРАЦИЯЛАУ САЛАСЫНДАҒЫ ЖЕТІСТІКТЕР:
СҰРАҚТАРДЫ АВТОМАТТЫ ТҮРДЕ ГЕНЕРАЦИЯЛАУ ӘДІСТЕРІНЕ, ДЕРЕКТЕР
ЖИЫНТЫҒЫНА ЖӘНЕ БАФАЛАУҒА ШОЛУ**

**ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЛАСТИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ ВОПРОСОВ:
ОБЗОР МЕТОДОВ, НАБОРОВ ДАННЫХ И ОЦЕНОК АВТОМАТИЧЕСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ
ВОПРОСОВ**

Abstract. Automatic Question Generation (AQG) is a rapidly growing area within artificial intelligence (AI) and natural language processing (NLP), focused on creating questions automatically from various sources like raw text, databases, and semantic representations. This review explores a wide range of AQG approaches, from traditional rule-based methods to advanced neural network models, including sequence-to-sequence, transformer-based, and graph-based architectures, as well as hybrid methods that combine linguistic rules with machine learning techniques. While rule-based systems offer clarity and control, they often struggle with complex language structures, whereas neural models, especially those using transformers like T5 and BART, have transformed AQG by enabling end-to-end learning and generating more contextually relevant questions. Hybrid models aim to balance the strengths of both approaches, enhancing flexibility and adaptability. The review also discusses evaluation methods, including automated metrics like BLEU, ROUGE, and METEOR, along with human assessments. Despite notable progress, challenges remain in achieving natural question fluency, semantic accuracy, and the generation of high-quality distractors for multiple-choice questions. Looking ahead, promising research directions include lifelong learning models, multimodal question generation that integrates text with images or code, and more robust evaluation frameworks. This review offers insights for researchers and practitioners, emphasizing AQG's potential to improve educational tools, conversational agents, and information retrieval systems.

Keywords: Automatic Question Generation, Natural Language Processing, Rule-based approaches, Neural Networks.

Аңдатпа. Сұрақтарды автоматты түрде жасау (AQG) – мәтіндік материалдар, дерекқорлар және семантикалық көріністер сияқты әртүрлі көздерден сұрақтарды автоматты түрде жасауға бағытталған жасанды интеллект (AI) және табиғи тілді өңдеудің (NLP) қарқынды дамып келе жатқан саласы. Бұл шолу AQG әдістерінің кең ауқымын қамтиды, дәстүрлі ережеге негізделген әдістерден нейрондық желілердің кеңейтілген үлгілеріне, соның ішінде реттілікке, трансформаторға және графикаға негізделген архитектураларға, сондай-ақ лингвистикалық ережелерді машиналық оқыту әдістерімен біріктіретін гибридік әдістерге дейін. Ережеге негізделген жүйелер анықтық пен бақылауды қамтамасыз еткенімен, олар күрделі тілдік құрылымдармен жиі күреседі, ал нейрондық модельдер, әсіресе T5 және BART сияқты трансформаторларды пайдаланатындар, соңына дейін оқуға мүмкіндік беру және контекстке

қатысты сұрақтарды шығару арқылы AQG-ны өзгертті. Гибридті модельдер икемділік пен бейімделуді арттыра отырып, екі тәсілдің де күшті жақтарын теңестіруге бағытталған. Шолу сонымен қатар бағалау әдістерін, соның ішінде BLEU, ROUGE және METEOR сияқты автоматтандырылған көрсеткіштерді, сондай-ақ адам бағалауларын талқылайды. Елеулі прогреске қарамастан, сұрақтардың табиғи еркіндігіне, семантикалық дәлдігіне қол жеткізу және бірнеше таңдаулы сұрақтар үшін жоғары сапалы дистракторларды жасауда қиындықтар әлі де бар. Перспективалы зерттеу бағыттары өмір бойы оқыту үлгілерін, мәтінді суреттермен немесе кодпен біріктіретін мультимодальды сұрақтарды генерациялауды және сенімдірек бағалау жүйелерін қамтиды. Бұл шолу AQG-нің білім беру құралдарын, сөйлесу агенттерін және ақпарат іздеу жүйелерін жақсартудағы әлеуетін көрсете отырып, зерттеушілер мен практиктерге әсер етеді.

Түйін сөздер: Сұрақтарды автоматты түрде құру, табиғи тілді өңдеу, ережеге негізделген тәсілдер, нейрондық желілер.

Аннотация. Автоматическая генерация вопросов (AQG) – стремительно развивающаяся область искусственного интеллекта (AI) и обработки естественного языка (NLP), ориентированная на автоматическое создание вопросов из различных источников, таких как текстовые материалы, базы данных и семантические представления. В данном обзоре рассматривается широкий спектр подходов к AQG, от традиционных методов, основанных на правилах, до продвинутых нейросетевых моделей, включая архитектуры на основе «последовательность-последовательность», трансформеров и графов, а также гибридные методы, сочетающие лингвистические правила с методами машинного обучения. Хотя системы, основанные на правилах, обеспечивают ясность и контроль, они часто не справляются со сложными языковыми структурами, в то время как нейронные модели, особенно использующие трансформеры, такие как T5 и BART, изменили AQG, обеспечив сквозное обучение и генерирование более контекстуально значимых вопросов. Гибридные модели призваны сбалансировать сильные стороны обоих подходов, повышая гибкость и адаптивность. В обзоре также рассматриваются методы оценки, включая автоматизированные метрики, такие как BLEU, ROUGE и METEOR, а также человеческие оценки. Несмотря на заметный прогресс, остаются проблемы, связанные с достижением естественной беглости вопросов, семантической точности и созданием высококачественных дистракторов для вопросов с несколькими вариантами ответов. Перспективные направления исследований включают модели обучения на протяжении всего существования, мультимодальную генерацию вопросов, объединяющую текст с изображениями или кодом, и более надежные системы оценки. В обзоре представлены наработки для исследователей и практиков, подчеркивающие потенциал AQG для улучшения образовательных инструментов, разговорных агентов и информационно-поисковых систем.

Ключевые слова: Автоматическая генерация вопросов, обработка естественного языка, подходы на основе правил, нейронные сети.

Introduction. Automatic question generation (AQG) stands as a pivotal area within artificial intelligence (AI), focused on automatically crafting questions from diverse input sources, encompassing databases, semantic representations, and raw text (Tran, Nguyen, Tran, Vo, 2023). Previous surveys that have explored AQG have primarily concentrated on specific facets or methodologies, such as rule-based approaches or particular applications (Yuan et al., 2022). This limited focus has left a gap in terms of a comprehensive understanding of the broader field of AQG. This survey distinguishes itself by presenting a systematic and in-depth examination of AQG, encompassing both traditional and modern techniques, a wide array of question categories, and a range of evaluation methods.

Traditional rule-based methods for QG, grounded in predetermined linguistic rules and patterns, offer transparency and controllability (Tran, Nguyen, Tran, Vo, 2023). However, these methods often demand extensive manual effort and may encounter difficulties when confronted with complex language structures. The emergence of neural QG models, particularly those built upon deep learning architectures such as sequence-to-sequence and transformer networks, has signaled a paradigm shift in the field (Dhole, Manning, 2022; Naeiji et al., 2023). These data-driven approaches present end-to-end trainable frameworks that can learn intricate patterns from

expansive datasets and generate questions that are more contextually relevant and diverse. Notable advancements in neural QG include the incorporation of attention mechanisms, copy mechanisms, and pre-trained language models, contributing to enhancements in performance and fluency within the generated questions (Fei, Zhang, Zhou, 2021; Sun et al., 2022; Naeiji et al., 2023; Dhole, Manning, 2022).

Section 1 provides an overview of various approaches to Automatic Question Generation (AQG), including rule-based, sequence-based, transformation-based, graph-based models and hybrid approaches. Section 2 focuses on evaluation methods, covering both automatic metrics and human assessments. Finally, Section 3 wraps up with the conclusion.

Classification of automatic question generation approaches. Automatic question generation (AQG) is a task that involves generating questions from various input formats like text, data, and knowledge bases (Leite, Cardoso, 2023; Blstak, Rozinajova, 2022). AQG systems can be categorized into three main types: rule-based, neural network-based and hybrid approaches (Huang et al., 2021). The following section will delve into a detailed classification of these approaches, examining the diverse methodologies and techniques employed within each category.

Rule-based approaches. Rule-based question generation (QG) systems operate by applying predefined linguistic rules and patterns to transform declarative sentences into questions. These systems typically involve a multi-stage process (Leite, Cardoso, 2023; Zhang, Zhang, Wang, 2022; Naeiji et al., 2023): First, the input sentence is parsed using techniques like dependency parsing (Sewunetie, Kovacs, 2024; Huang et al., 2021; Zhang, Wang, 2022), part-of-speech tagging (Blstak, Rozinajova, 2022), named entity recognition (Sewunetie, Kovacs, 2024), and semantic role labeling (Zhang, Zhang, Wang, 2022; Sewunetie, Kovacs, 2024; Leite, Cardoso, 2023) to identify key linguistic features. Next, this information is matched against a set of predefined rules or templates that specify how different sentence structures should be transformed into questions (Huang et al., 2021; Zhang, Wang, 2022; Barlybayev, Matkarimov, 2024). Finally, the system uses these rules to generate a corresponding question, often targeting specific elements of the input sentence, like the subject, object, or location. While this approach may require considerable effort in crafting rules, rule-based QG systems offer transparency, controllability, and ensure grammatically well-formed questions (Dhole, Manning, 2022). They are particularly useful in scenarios with limited training data, such as low-resource languages, where neural network-based methods may not be feasible (Leite, Cardoso, 2023). Table 1 provides a comparative overview of rule-based approaches.

Neural Network-based approaches. Neural network-based approaches have achieved remarkable success in Automatic Question Generation (AQG), surpassing traditional rule-based methods by leveraging the power of deep learning to learn complex patterns from data and generate diverse and contextually relevant questions. These approaches can be broadly categorized into three main types: Seq2Seq, Transformer-based, and Graph-based approaches. The sequence-to-sequence (Seq2Seq) architecture is at the core of most neural automatic question generation (AQG) systems (Zhang, Zhang, Wang, 2022; Leite, Cardoso, 2023; Barlybayev, Matkarimov, 2024). This architecture is built around two key components: an encoder and a decoder. The encoder processes the input text, such as a sentence or paragraph, and converts it into a fixed-length vector, often called the context vector, which encapsulates the essential meaning of the input. The decoder then uses this context vector to generate a question, crafting it word by word. By leveraging patterns from training data and the context provided by the encoder, the decoder transforms the encoded information into coherent and relevant questions.

Table 1. Summary of rule-based approaches used for AQG

Model	Automatic evaluation	Human evaluation		
Dependency parsing, part-of-speech tagging, chunking, and named entity recognition to identify sentence templates	-	412 questions evaluated in total		
			Simple sentences	Complex sentences
		Grammatical	76.95%	76.95%
		Make sense	52.31%	52.31%
		Vague	47.69%	47.69%
		Correct	329	77
		Spurious	300	105
		Missed	57	39
		Precision	0.52	0.42
		Recall	0.85	0.66
		F-Score	0.65	0.51
Tag-set sequence to capture syntactic and semantic information	-		Total	
		TSSP-DB entry pairs	122	
		QAPs generated	796	
		All correct	773	
		Syntactically acceptable	13	
		Semantically acceptable	8	
		Unacceptable	2	
Syntactic rules with universal dependencies, shallow semantic parsing, and back-translation	BLEU-1	45.55	Grammatical correctness and relevance score. The inter-rater agreement (Krippendorff's coefficient) is 0.72	
	BLEU-2	30.24		
	BLEU-3	23.84		
	BLEU-4	18.72		
Syntactic information, semantic roles, dependency labels, discourse connectors, and relative pronouns/adverbs	BLEU-4	32.33	Machine-generated questions are indistinguishable from human-authored questions in 51.9% of the cases	
	ROUGE-L	53.14		
	BERTScore	85.49		
Dependency parsing, NER, and adverb/noun subtype analysis	Metrics	Type	Score	Overall score 3.67 out of 5.0
	BLUE	1-gram	0.86	
		2-gram	0.78	
		3-gram	0.77	
		4-gram	0.75	
	ROUGE-1	F1-Score	0.62	
		Precision	0.59	
	ROUGE-2	Recall	0.65	
		F1-Score	0.53	
	ROUGE-L	Precision	0.52	
		Recall	0.55	
		F1-Score	0.62	
		Precision	0.59	
		Recall	0.65	

Note: compiled by the author based on (Tran, Nguyen, Tran, Vo, 2023; Yuan et al., 2022; Dhole, Manning, 2022; Leite, Cardoso, 2023; Sewunetie, Kovacs, 2024)

Early sequence-to-sequence (Seq2Seq) models for automatic question generation (AQG) primarily relied on Recurrent Neural Networks (RNNs), particularly Long Short-Term Memory (LSTM) networks, for both the encoding and decoding stages (Barlybayev, Matkarimov, 2024; Leite, Cardoso, 2023; Huang et al., 2021). While RNNs are well-suited for processing sequential data, they often struggle to capture long-term dependencies in text (Blstak, Rozinajova, 2022; Fei, Zhang, Zhou, 2021). LSTMs address this challenge by introducing a memory cell that can selectively retain or discard information from earlier steps, allowing them to manage the complexities of language more effectively (Barlybayev, Matkarimov, 2024; Huang et al., 2021; Leite, Cardoso, 2023). Table 2 offers a comparative summary of various Seq2Seq models.

Table 2. Summary of Seq2seq-based models

Model	Dataset	Automatic evaluation					Human evaluation		
		BLEU-1	BLEU-2	BLEU-3	BLEU-4	ROUGE-L	Repetition	Incomplete	Accuracy
Fine-grained Question Type Classifier and BiLSTM Encoder	SQuAD	47.28	31.35	23.02	17.52	46.78	6.48%	19.18%	87.67%
	HotpotQA	42.35	30.42	23.83	19.37	17.52	5.63%	16.20%	65.50%
	TibetanQA	42.45	35.07	29.64	25.58	43.28	7.38%	39.34%	46.72%
Semantic Role Labeler (Seq2seq model and two semantic mappers)	SQuAD Car Manuals NewsQA	Precision					Scale (1 – 5) Clarity: 4.75 Relatedness: 4.61 Grammar: 4.93		
		METEOR		BLEU-4		ROUGE-L			
		21.8 61.8		20.02 85.1		46.9 93.7			

Note: compiled by the author based on (Sun et al., 2022; Naeiji et al., 2023)

The introduction of Transformer models marked a paradigm shift in neural AQG. Transformers, like T5 (Zhang, Zhang, Wang, 2022), BART (Barlybayev, Matkarimov, 2024; Su et al., 2020; Dijkstra et al., 2024), BERT (Barlybayev, Matkarimov, 2024), UniLM (Leite, Cardoso, 2023; Zhang, Zhang, Wang, 2022), GPT (Dijkstra et al., 2024; Murakhovska et al., 2022) and ERNIE-GEN (Leite, Cardoso, 2023; Murakhovska et al., 2022), have revolutionized the field by relying solely on self-attention mechanisms rather than the sequential processing of RNNs. This allows them to process the entire input sentence in parallel, enabling them to capture long-range dependencies more effectively and generate more fluent and coherent questions (Lopez et al., 2021; Dijkstra et al., 2024; Sun et al., 2022; Dhole, Manning, 2022; Yuan et al., 2022; Tran, Nguyen, Tran, Vo, 2023). The success of Transformer-based AQG is further amplified by pre-training on massive text datasets. These pre-trained models come equipped with rich language representations that can be fine-tuned for specific tasks like AQG. By leveraging these pre-trained representations, Transformer-based AQG models have achieved state-of-the-art results on various benchmarks (Su et al., 2020; Dijkstra et al., 2024; Murakhovska et al., 2022; Yuan et al., 2022). Automatic evaluation is often conducted on different datasets to assess their performance. A summary of Transformer-based models is presented in Table 3.

Table 3. Summary of transformer-based models

Model	Dataset	Automatic evaluation							Human evaluation
		BLEU-1	BLEU-2	BLEU-3	BLEU-4	ROUGE-L	METEOR	BERTScore	
Unified-QG employs a format-convert encoding to transform various QG formats into a unified representation	MCTest SQuAD RACE NarrativeQA Arc-easy Arc-hard OpenbookQA BoolQA	54.35 46.50 36.59 38.64 30.85 27.04 34.32 48.84	40.08 32.29 24.86 23.45 19.81 16.51 22.57 33.10	32.09 24.44 17.71 16.43 13.85 11.05 15.76 24.19	25.48 19.20 12.95 12.19 10.17 7.83 11.33 18.04	55.54 47.42 33.53 41.59 36.79 33.66 35.18 46.08	27.75 23.90 19.33 18.64 17.78 15.82 19.43 23.27	-	-
Uses a single pre-trained GPT-2 transformer for paragraph-level QG without additional features or answer metadata	SQuAD	55.28	30.81	16.55	8.21	44.27	21.11	-	-
EduQuiz is based on a GPT-3 model fine-tuned on text-quiz pairs for end-to-end quiz generation	EQG-RACE (processed RACE dataset with only examination questions)	-	-	-	11.61	36.11	25.42	-	Fluency, Relevancy, Answerability of: Question: 96.3% Answer: 89.4% Distractors: 85.8%
MixQG leverages a text-to-text framework with pre-trained language models like T5 and BART	SQuAD NQ QAConv Quoref DROP TweetQA	- - - - - -	- - - - - -	- - - - - -	23.46 31.25 22.74 27.36 28.53 18.66	50.10 57.84 44.40 44.42 51.12 45.94	44.15 55.90 39.93 42.06 47.83 46.60	0.5582 0.5351 0.4533 0.4137 0.5493 0.4645	No error: 68.4% Disfluent: 9.7% Off target: 5.8% Wrong Context: 16.2%
Leaf fine-tunes the T5 transformer on SQuAD 1.1 for multi-task question and answer generation	SQuAD RACE	34.47	-	-	-	-	-	-	Exact match: 41.51% F1-Score: 53.26%
TP3 fine-tunes pre-trained transformers on QAP datasets	SQuAD Gaokao-EN	-	-	-	22.62	50.98	48.98	55.82	Ratio of adequate QAPs over all QAPs being generated: 86.65
Develops a comprehensive system for MCQ generation, including question and answer generation and distractor formulation	SQuAD Quasar RACE CoQA MS MARCO	52.58	36.27	25.15	17.59	49.66	28.03	-	-

Note: compiled by the author based on (Yuan et al., 2022; Lopez et al., 2021; Dijkstra et al., 2024; Murakhovska et al., 2022; Vachev et al., 2022; Zhang, Zhang, Wang, 2022; Barlybayev, Matkarimov, 2024)

Graph-based models, particularly Graph Convolutional Networks (GCNs), have been explored to incorporate syntactic structure information into neural AQG systems. GCNs excel at capturing dependency relationships between words in a sentence, providing a deeper understanding of sentence structure that aids in generating grammatically and semantically coherent questions (Huang et al., 2021; Fei, Zhang, Zhou, 2021; Su et al., 2020; Dhole, Manning, 2022). Table 4 gives comparative overview of graph-based models.

Hybrid approaches. Hybrid approaches to question generation (QG) combine multiple techniques to leverage the strengths of each, often resulting in more resilient and adaptable systems (Blstak, Rozinajova, 2022; Alshboul, Baksa-Varga, 2024). These approaches typically incorporate rule-based methods that utilize linguistic knowledge with data-driven methods that depend on statistical models and machine learning (Blstak, Rozinajova, 2022; Alshboul, Baksa-Varga, 2024; Panchal, Thakkar, Pillai, Patil, 2021). Table 5 provides a summary of models using the hybrid approach.

Table 4. Summary of graph-based models

Model	Dataset	Automatic evaluation						Human evaluation
		BLEU-1	BLEU-2	BLEU-3	BLEU-4	ROUGE-L	METEOR	
MulQG (Multi-Hop Encoding Fusion Network for QG) extends the Seq2Seq QG framework with multi-hop context encoding. Employs GCN on dynamic entity graph to aggregate evidence related to questions	HotpotQA	40.08	26.58	19.61	15.11	35.35	20.24	Fluency: 0.43 Answerability: 0.61 Completeness: 0.33
IGND (Iterative Graph Network-based Decoder) models the structure information in the previous generation at each decode step using a GNN. Captures dependency relations in the passage	SQuAD MS MARCO	50.82 -	34.73 -	25.64 -	20.33 23.87	48.94 -	- -	Fluency: 4.24 Relevancy: 4.33 Answerability: 4.26
EGSS (Entity Guided Question Generation model) uses GCN and Bi-LSTM to capture structure and sequence information from context. Employs an entity-guided approach to obtain question type from the answer	SQuAD	50.86	34.42	25.44	19.45	47.29	23.54	Grammaticality : 4.06 Relevancy: 4.37 Answerability: 4.01
Note: compiled by the author based on (Su et al., 2020; Fei, Zhang, Zhou, 2021; Huang et al., 2021)								

Evaluation techniques. Evaluating automatic question generation (AQG) systems is essential for ensuring that the generated questions are high-quality, relevant, and appropriately challenging. Two main evaluation methods are used: automatic evaluation with computational metrics and human-based evaluation. Automatic evaluation compares generated questions to

reference questions, typically human-authored, using metrics such as BLEU (Leite, Cardoso, 2023; Sewunetie, Kovacs, 2024; Blstak, Rozinajova, 2022), ROUGE (Zhang, Zhang, Wang, 2022; Leite, Cardoso, 2023), METEOR (Su et al., 2020; Barlybayev, Matkarimov, 2024; Sewunetie, Kovacs, 2024; Huang et al., 2021), and BERTScore (Murakhovska et al., 2022; Zhang, Zhang, Wang, 2022). These metrics focus on lexical and semantic similarity, providing quick and cost-effective assessments. However, they often fail to fully capture aspects like answerability, relevance, and cognitive demand, making them less reliable indicators of overall question quality.

Human-based evaluation is critical for a more nuanced analysis, as it accounts for qualities that automatic metrics might miss. Human evaluators focus on criteria like grammaticality, fluency, relevance, answerability, clarity, cognitive demand, and distractor quality in multiple-choice questions. Grammaticality ensures syntactic well-formedness, while relevance checks how well questions align with the content (Leite, Cardoso, 2023; Blstak, Rozinajova, 2022; Huang et al., 2021).

Table 5. Summary of hybrid approaches

Model	Dataset	Automatic evaluation					Human evaluation
		BLEU-1	BLEU-2	BLEU-3	BLEU-4	ROUGE-L	
Sentence Structure Analysis, Rule Learning, and Evaluation Module	SQuAD	0.83	0.78	0.74	0.71	0.87	Syntax: 86.5% Semantics: 76.8%
Semantic code conversion using ontology and an AI-based question generator - QuestGen AI	-	-					Average validity of the generated questions is 4,2 out of 5
Machine learning classification-based Fill-in-the-Blank (FIB) generator and a rule-based approach to generate Wh-type questions	SQuAD	BLEU		FIB questions (Total 100)	Wh-type questions (Total 100)		Total 200 questions: Grammatical score: 0.64 Answerability score: 0.49 Difficulty score: 0.41 Context score: 0.77
		0.73	Correct Incorrect Success rate	59 41 59%	49 51 49%		
Note: compiled by the author based on (Blstak, Rozinajova, 2022; Alshboul, Baksa-Varga, 2024; Panchal, Thakkar, Pillai, Patil, 2021)							

Cognitive demand assesses the intellectual level required, and distractor quality impacts the effectiveness of multiple-choice questions (Leite, Cardoso, 2023; Blstak, Rozinajova, 2022). Various evaluation methods, such as Likert scales (Leite, Cardoso, 2023), binary judgments (Dijkstra et al., 2024), or comparative assessments (Sun et al., 2022), are used to capture these qualities. Researchers often combine both automatic and human evaluations for a more

comprehensive assessment, as each offers unique strengths (Leite, Cardoso, 2023). By tailoring evaluation strategies to the specific goals and characteristics of AQG systems, a more accurate and meaningful measure of question quality can be achieved (Blstak, Rozinajova, 2022).

Conclusion. This survey provides an overview of recent work in the area of Automatic Question Generation (AQG), focusing on the methodologies, techniques, and evaluation techniques. AQG systems are categorized into rule-based, neural network-based, and hybrid approaches, each offering distinct strengths and weaknesses. Rule-based systems are transparent and controllable, but require extensive manual effort. In contrast, neural network-based methods, particularly sequence-to-sequence, transformer-based, and graph-based models, have made significant strides in generating diverse, contextually relevant questions, driven by deep learning techniques. The survey also underscores the importance of robust evaluation techniques, emphasizing the need to balance automatic metrics like BLEU and ROUGE with human assessments to capture nuanced aspects of question quality, such as relevance, answerability, and cognitive demand. Despite the progress made, challenges remain in ensuring the generated questions meet human standards for fluency, naturalness, and semantic accuracy. The limitations of current evaluation metrics further highlight the need for more comprehensive measures of question quality. Looking ahead, AQG research is poised for exciting developments, particularly in multimodal question generation, which will integrate textual data with visual and auditory inputs. Hybrid models, which combine rule-based and neural network techniques, may offer improved performance and adaptability. The continued evolution of AQG holds great potential for transforming applications in education, information retrieval, and human-computer interaction, fostering a deeper and more engaging learning experience.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgements. This research is funded by the authors' own funds.

“Notification of the use of generative AI and technologies using it in the process of writing the manuscript”. The authors did not use tools of artificial intelligence services in the preparation of this paper.

References

- Alshboul J. and Baksa-Varga E. (2024). A Hybrid Approach for Automatic Question Generation from Program Codes, <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2024.0150102>.
- Barlybayev A. and Matkarimov B. (2024). Development of system for generating questions, answers, distractors using transformers. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 1851–1863, <https://doi.org/10.11591/ijece.v14i2.pp1851-1863>.
- Blstak M. and Rozinajova V. (2022). Automatic question generation based on sentence structure analysis using machine learning approach. *Nat Lang Eng*, vol. 28, no. 4, pp. 487–517, <https://doi.org/10.1017/S1351324921000139>.
- Dijkstra R., Genc Z., Kayal S., and Kamps J. (2022). Reading Comprehension Quiz Generation using Generative Pre-trained Transformers. Accessed: Dec. 30, 2024. [Online]. Available: https://e.humanities.uva.nl/publications/2022/dijk_read22.pdf
- Dhole K. D. and Manning C. D. (2022). Syn-QG: Syntactic and Shallow Semantic Rules for Question Generation, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.08694>.
- Fei Z., Zhang Q., and Zhou Y. (2021). Iterative GNN-based Decoder for Question Generation, <https://doi.org/10.18653/v1/2021.emnlp-main.201>.
- Huang Q. et al. (2021). Entity Guided Question Generation with Contextual Structure and Sequence Information Capturing, <https://doi.org/10.1609/aaai.v35i14.17544>.
- Leite B. and Cardoso H. L. (2023). Do Rules Still Rule? Comprehensive Evaluation of a Rule-Based Question Generation System. *International Conference on Computer Supported Education, CSEDU - Proceedings, Science and Technology Publications, Lda, 2023*, pp. 27–38, <https://doi.org/10.5220/0011852100003470>.

- Lopez L. E., Cruz D. K., Cruz J. C. B., and Cheng C. (2021). Simplifying Paragraph-level Question Generation via Transformer Language Models, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.01107>.
- Murakhovska L., Wu C.-S., Laban P., Niu T., Liu W., and Xiong C. (2022). MixQG: Neural Question Generation with Mixed Answer Types, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.08175>.
- Naeiji A., An A., Davoudi H., Delpisheh M., and Alzghool M. (2023). Question Generation Using Sequence-to-Sequence Model with Semantic Role Labels, doi: 10.18653/v1/2023.eacl-main.207.
- Panchal P., Thakkar J., Pillai V., and Patil S. (2021). Automatic Question Generation and Evaluation. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, vol. 23, no. 05, pp. 751–761, <https://doi.org/10.51201/JUSST/21/05203>
- Sun Y., Liu S., Dan Z., and Zhao X. (2022). Question Generation Based on Grammar Knowledge and Fine-grained Classification. Accessed: Dec. 30, 2024. [Online]. Available: <https://aclanthology.org/2022.coling-1.562>
- Su D., Xu Y., Dai W., Ji Z., Yu T., and Fung P. (2020). Multi-hop Question Generation with Graph Convolutional Network, <https://doi.org/10.18653/v1/2020.findings-emnlp.416>.
- Sewunetie W.T. and Kovacs L. (2024). Automatic question generation using extended dependency parsing. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, vol. 33, no. 2, pp. 1108–1115, <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i2.pp1108-1115>.
- Tran P., Nguyen D. K., T. Tran, and Vo B. (2023). Using Syntax and Shallow Semantic Analysis for Vietnamese Question Generation. KSII Transactions on Internet and Information Systems, vol. 17, no. 10, pp. 2718–2731, <https://doi.org/10.3837/tiis.2023.10.007>.
- Vachev K., Hardalov M., Karadzhov G., Georgiev G., Koychev I., and Nakov P. (2022). Leaf: Multiple-Choice Question Generation, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.09012>.
- Yuan W., Yin H., He T., Chen T., Wang Q., and Cui L. (2022). Unified Question Generation with Continual Lifelong Learning. Proceedings of the ACM Web Conference 2022, Association for Computing Machinery, Inc, pp. 871–881, <https://doi.org/10.1145/3485447.3511930>.
- Zhang C. and Wang J. (2022). Tag-Set-Sequence Learning for Generating Question-Answer Pairs, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.11608>.
- Zhang C., Zhang H., and Wang J. (2022). Downstream Transformer Generation of Question-Answer Pairs with Preprocessing and Postprocessing Pipelines, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.07387>.

Information about authors

Lopatkin Dmitriy Vitalievich – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, lopatkin.d@edu.ektu.kz, ORCID: 0009-0003-8735-5997, +77775264039

Rokhas Kriulko Natalia Petrovna – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, nrohas@edu.ektu.kz, ORCID: 0009-0006-6841-0593, +77772462861

Kotlyarova Irina Aleksandrovna – Master of Engineering and Technology, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, IKotlyarova@edu.ektu.kz, ORCID: 0009-0006-5372-4207, +77772549051

Popova Galina Vladimirovna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, gpopova@edu.ektu.kz, ORCID: 0000-0002-6935-1066, +77473371938

Vais Yuriy Andreevich – Candidate of Technical Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, YuVais@edu.ektu.kz, ORCID: 0000-0002-2964-8260, +77052502872

АҚПАРАТТЫК, ЖҮЙЕЛЕР
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
INFORMATION SYSTEMS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_182
MPHTI 28.23.37

**Д.О. Оралбекова¹, О.Ж. Мамырбаев¹, А.Б. Имансакипова²,
А.Ж. Жигер³, К.Ж. Мухсина¹**

¹Институт информационных и вычислительных технологий, г. Алматы, Казахстан

E-mail: dinaoral@mail.ru*

E-mail: morkenj@mail.ru

E-mail: email123@gmail.com

²Алматинский технологический университет, г. Алматы, Казахстан

E-mail: aimansakipova@bk.ru

³Университет Нархоз, г. Алматы, Казахстан

E-mail: alia_94-22@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ LSTM И BERT ДЛЯ ЗАДАЧ МУЛЬТИКЛАССИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАБОРА ДАННЫХ NER

NER ДЕРЕКТЕР ЖИНАСЫН ПАЙДАЛАНУ НЕГІЗІНДЕ КӨПӨЛШЕМДІ ЖІКТЕЛУ МӘСЕЛЕЛЕРІНІҢ LSTM ЖӘНЕ BERT МОДЕЛІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ЗЕРТТЕУІ

A COMPARATIVE STUDY OF LSTM AND BERT MODELS FOR MULTI-CLASSIFICATION TASKS USING NER DATASET

Аннотация. В статье проведён сравнительный анализ моделей LSTM и BERT, применяемых к задачам мультиклассификации на казахском языке с использованием набора данных для распознавания именованных сущностей. Основной акцент исследования сделан на преодоление проблемы ограниченности ресурсов для обработки текстов на казахском языке посредством адаптации существующих методов машинного обучения для анализа многомерных классификационных задач. Оба подхода продемонстрировали свою эффективность в различных аспектах обработки текстовых данных, включая моделирование контекстных зависимостей и точную классификацию по множеству категорий. Модель LSTM показала высокую способность к учёту временных зависимостей в тексте, что делает её пригодной для решения задач классификации в условиях ограниченных языковых ресурсов. В то же время модель BERT, основанная на архитектуре Transformer, продемонстрировала конкурентоспособные результаты в области контекстного анализа и обработки сложных текстовых структур, что обеспечивает её более высокую производительность при мультиклассификации текстов на казахском языке. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что обе модели могут эффективно применяться для задач классификации текстов на казахском языке, однако модель BERT продемонстрировала более стабильные и надёжные результаты, обусловленные её способностью к более глубокому контекстуальному пониманию. Полученные данные подчёркивают значимость использования современных методов обработки естественного языка для языков с ограниченными ресурсами и открывают перспективы для их дальнейшего исследования и практического применения.

Ключевые слова: NLP, мультиклассификация, NER, LSTM, BERT, малоресурсный язык.

Аңдатпа. Мақалада аталған нысанды тану үшін деректер жиынтығын пайдалана отырып, қазақ тіліндегі көп классификациялық есептерге қолданылатын LSTM және BERT модельдерінің салыстырмалы талдауы берілген. Зерттеу жұмысының негізгі бағыты көпөлшемді жіктеу мәселелерін талдау үшін қолданыстағы машиналық оқыту әдістерін бейімдеу арқылы қазақ тіліндегі мәтіндерді өңдеу ресурстарының шектеулі мәселесін шешуге бағытталған. Екі модель де мәтіндік деректерді өңдеудің әртүрлі аспектілерінде, соның ішінде контекстік тәуелділіктерді модельдеуді және бірнеше санаттарға дәл жіктеуді қоса, олардың тиімділігін көрсетті. LSTM моделі мәтіндегі уақытша тәуелділіктерді есепке алудың жоғары мүмкіндігін

көрсетті, бұл оны шектеулі тілдік ресурстар жағдайында жіктеу мәселелерін шешуге қолайлы етеді. Сонымен бірге, Transformer архитектурасына негізделген BERT моделі контекстік талдау және күрделі мәтін құрылымдарын өңдеу саласында өте жақсы нәтиже көрсетті, бұл қазақ тіліндегі мәтіндерді көпөлшемді жіктеуде оның жоғары өнімділігін қамтамасыз етеді. Эксперименттік нәтижелер екі модельді де қазақ тіліндегі мәтінді жіктеу тапсырмаларында тиімді пайдалануға болатынын көрсетеді, бірақ BERT моделі тереңірек контекстік түсінуді қамтамасыз ету қабілетінің арқасында тұрақты және сенімді нәтижелер көрсетті. Қорытындылар ресурстары шектеулі тілдер үшін табиғи тілді өңдеудің заманауи әдістерін қолданудың маңыздылығын көрсетеді және оларды әрі қарай зерттеу мен практикалық қолдану перспективаларын ашады.

Түйін сөздер: NLP, көпөлшемді жіктелу, NER, LSTM, BERT, ресурсы аз тіл.

Abstract. The article presents a comparative analysis of LSTM and BERT models applied to multi-classification tasks in the Kazakh language using a named entity recognition dataset. The study primarily focuses on addressing the issue of limited resources for processing Kazakh text by adapting existing machine learning methods for the analysis of multidimensional classification tasks. Both approaches have demonstrated their effectiveness in various aspects of text data processing, including modeling contextual dependencies and accurately classifying multiple categories. The LSTM model exhibited a high capability for capturing temporal dependencies in text, making it suitable for classification tasks in low-resource language settings. Meanwhile, the BERT model, based on the Transformer architecture, showed superior results in contextual analysis and processing of complex text structures, ensuring higher performance in multi-classification of Kazakh text. The experimental results indicate that both models can be effectively employed for text classification tasks in the Kazakh language. However, the BERT model demonstrated more stable and reliable outcomes, attributed to its ability for deeper contextual understanding. The findings underscore the importance of applying modern natural language processing (NLP) methods to low-resource languages and open new avenues for further research and practical application.

Keywords: NLP, multiclassification, NER, LSTM, BERT, low-resource language.

Введение. В сфере обработки естественного языка (NLP) (Oralbekova et al., 2023) классификация текста становится фундаментальной задачей с широким спектром применений: от анализа настроений до категоризации документов. Классификация текстов представляет собой процесс распределения текстов по конкретным категориям или классам, основываясь на их содержании и характеристиках (Dogra et al., 2022). Эта задача является ключевой в лингвистике и обработке естественного языка (NLP). Она имеет широкое применение в различных сферах, включая анализ настроений в текстах, определение их тематики, фильтрацию спама и другое. Целью классификации текстов является систематизация и структурирование больших массивов текстовой информации, что позволяет упростить их анализ и поиск. В целом классификация текстов способствует организации, анализу и извлечению информации из текстового контента, делая его более доступным и полезным для различных задач и целей. Например, тексты можно разделить по жанру, стилю, тематике или авторству, чтобы исследовать их различия и общие черты, а также выявить определенные закономерности.

Задача классификации становится особенно сложной для языков со скудными вычислительными ресурсами, таких как казахский, где нехватка доступных наборов данных для задач классификации создает серьезные препятствия. Несмотря на существование многочисленных исследований, подробно описывающих методологии предварительной обработки и подготовки данных для казахского языка (Mamyrbayev, Oralbekova, 2020), а также относительную простоту поиска необработанных данных, по-прежнему не хватает общедоступных наборов данных, подходящих для различных практических приложений классификации.

Чтобы устранить этот пробел, наше исследование стремится использовать потенциал существующих ресурсов (Yeshpanov, Khassanov, Varol, 2022), в частности, адаптируя методологию и результаты предыдущих исследований. Этот подход не только использует богатые лингвистические особенности казахского языка, но также подчеркивает

важность инновационных стратегий NLP в активизации усилий по классификации текстов для недостаточно представленных языков. Эта работа основана на новой схеме мультиклассификации, полученной на основе наборов данных распознавания именованных объектов (NER), что открывает путь для практических приложений, требующих детальной категоризации текста.

Благодаря этому начинанию мы стремимся внести свой вклад в расширение объема исследований NLP, ориентированных на казахский язык, демонстрируя жизнеспособность передовых и наиболее часто используемых моделей машинного обучения, таких как LSTM (Bai, 2018) и BERT (Zhang et al., 2020), в решении уникальных проблем, связанных с менее широко изучаемыми языками. Наша методология, основанная на адаптации существующих наборов данных для целей мультиклассификации, обещает предложить новый взгляд на практическую реализацию методов NLP в лингвистически разнообразных условиях.

Новизна нашего исследования заключается в использовании подходов, ранее применявшихся к языкам с богатыми ресурсами, для улучшения классификации текстов на казахском языке, который является языком с ограниченными ресурсами. Наша цель – разработать и внедрить эффективные методологии мультиклассификации, используя существующие наборы данных NER, и адаптировать их для более точной и глубокой категоризации текстов. Мы стремимся показать, что модели LSTM и BERT могут успешно решать задачи классификации для недостаточно изученных языков, обеспечивая тем самым расширение области применения NLP и улучшение качества обработки текстов на казахском языке.

Литературный обзор. Исследователи (Maheen et al., 2022) предлагают архитектуру, которая комбинирует слои CNN + BiLSTM + CNN для того, чтобы превзойти производительность моделей классификации текстов, связанных с BERT, в языках с ограниченными ресурсами. Проведенные эксперименты показывают, что предложенный подход показал конкурентоспособный результат в различных задачах NLP на бенгальском языке и в задаче обнаружения эмоций из шести классов для нового набора данных на бенгальском языке. Также предложенная модель превосходит реализацию BERT для вьетнамских языков и почти так же работает в задачах английского NLP, который тоже имеет искусственный дефицит данных.

В (Garrido-Merchan et al., 2023) исследовали эмпирическое поведение BERT на основе набора различных данных по сравнению со словарем TF-IDF. После добавления эмпирических доказательств в поддержку использования BERT результаты показали превосходство модели BERT над стандартными подходами и независимость от особенностей задачи NLP.

В (Yu et al., 2024) была построена квантово-классическая гибридная архитектура. Данный подход использует предварительно обученную многоязычную двунаправленную модель кодировщика из модели BERT для получения векторных представлений слов и объединяет предлагаемую квантово-рекуррентную нейронную сеть пакетной загрузки и квантовую рекуррентную нейронную сеть с необщей пакетной загрузкой параметров в качестве моделей извлечения признаков для анализа тональности на бенгальском языке, который является малоресурсным языком. Проведенные эксперименты показали, что предложенная архитектура обеспечивает максимальное повышение точности на 0,993 % в задачах классификации бенгальского текста при одновременном снижении средней сложности модели на 12 %.

Положение NLP для казахского языка постепенно обогащается благодаря различным целенаправленным исследованиям. Одной из основополагающих работ является исследование экспериментов по расширенному языковому моделированию казахского

языка (Myrzakhmetov, Kozhirbayev, 2018), которое заложило основу для понимания сложностей, связанных с созданием вычислительных ресурсов для недостаточно представленных языков. Это исследование подчеркивает первоначальные шаги по адаптации передовых методов NLP к казахскому языку, подчеркивая потенциал сложных языковых моделей для улучшения обработки и понимания текста.

Основываясь на этих основополагающих моделях, недавние достижения продемонстрировали адаптируемость современных технологий, таких как BERT, к казахскому языку. В частности, исследование извлечения ключевых слов из наборов данных казахстанских новостей с использованием BERT (Abibullayeva, Kazbekova, Zhunissov, 2024) показало, как модели на основе Transformer могут эффективно использоваться для задач, требующих глубокого семантического понимания, таких как определение ключевых терминов и фраз, которые отражают суть новостных статей. Это приложение не только демонстрирует гибкость BERT, но и его потенциал для улучшения поиска информации и анализа контента на казахском языке.

Центральное место в текущем исследовании занимает набор данных KazNERD (Yeshpanov, Khassanov, Varol, 2022), который является значительным вкладом в эту область и предоставляет богато аннотированный корпус для NER на казахском языке. Создание и использование этого набора данных знаменует собой важнейший прогресс в исследованиях NLP для казахского языка, предлагая ценный ресурс для обучения и оценки моделей NLP для задач распознавания сущностей. Этот набор данных служит основой для нашей работы, позволяя исследовать проблемы мультиклассификации через призму NER.

Дальнейшее расширение сферы применения NLP на казахском языке, классификация научных документов с использованием глубоких нейронных сетей и слияние изображений и текста (Bogdanchikov, Ayazbayev, Varlamis, 2022) иллюстрируют новые подходы, изучаемые в сообществе. В этой работе особое внимание уделяется интеграции мультимодальных данных для целей классификации и предлагаются новые пути повышения производительности модели и ее применимости при обработке текстов на казахском языке.

Модели и методы. Для работы с текстом существует большое количество решений. Самая простая и популярная связка – TF-IDF + линейная модель. Данный подход позволяет обрабатывать и решать языковые задачи без особых затрат вычислительных ресурсов. Однако процесс использования такой связки требует дополнительных операций: чистка, лемматизация. Кроме того, модели, использующие LSTM-архитектуру, также требуют предобработки текста. В случае с BERT можно опустить препроцессинг и сразу перейти к токенизации и обучению. Помимо дополнительных шагов, линейные модели часто выдают некорректные результаты, так как не учитывают контекст слов. Понимание контекста является главным преимуществом Transformer.

LSTM. Одним из наиболее эффективных методов для этой задачи являются рекуррентные нейронные сети (RNN), и в частности их улучшенная версия – длинная краткосрочная память (LSTM).

Архитектура модели классификации текста на основе LSTM состоит из трех основных компонентов:

- 1) входной слой (embedding layer) – преобразует входной текст в векторные представления,
- 2) LSTM-слой – извлекает временную зависимость и характеристику из последовательности векторных представлений,
- 3) полносвязный слой (dense layer) – преобразует выходы LSTM-слоя в целевые классы.

Входной слой (Embedding Layer). Пусть $X = [x_1, x_2, \dots, x_T]$ – входная последовательность текстовых токенов, где T – длина последовательности. Каждый токен x_t из словаря V представляется как вектор $e_{x_t} \in \mathbb{R}^d$, где d – размерность векторного пространства (1).

$$E = [e_{x_1}, e_{x_2}, \dots, e_{x_t}], \quad (1)$$

где: $E \in \mathbb{R}^{T \times d}$ – матрица эмбедингов.

Полносвязный слой (Dense Layer). Выходное скрытое состояние последнего временного шага h_T передается на вход полносвязного слоя, который выполняет классификацию (2):

$$y = \text{softmax}(W_d h_T + b_d). \quad (2)$$

Здесь $W_d \in \mathbb{R}^{h \times C}$ – обучаемая весовая матрица, $b_d \in \mathbb{R}^C$ – обучаемое смещение, C – количество классов.

Для обучения модели используется кросс-энтропийная функция потерь (3):

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{c=1}^C y_{i,c} \log(\hat{y}_{i,c}), \quad (3)$$

где: N – количество обучающих примеров;

$y_{i,c}$ – истинная метка класса c для примера i ,

$\hat{y}_{i,c}$ – предсказанная вероятность класса c для примера i .

Оптимизация параметров модели производится с использованием алгоритма Adam.

Метод классификации текста на основе LSTM хорошо учитывает временные зависимости и последовательные характеристики текста, что позволяет достичь высоких результатов в задачах классификации.

BERT. Модель BERT от Google является одной из самых эффективных для задач обработки естественного языка. Она предварительно обучена на текстах из открытых источников, таких как Wikipedia и BookCorpus. Архитектура модели основана на технологии Transformer, которая позволяет учитывать зависимости между словами в тексте. После дообучения на специализированных данных BERT достигает отличных результатов в решении задач.

Архитектура BERT включает компонент Encoder от Transformer. Существуют базовые и большие версии модели, отличающиеся количеством слоев и голов внимания: базовая версия имеет 12 слоев, большая – 24 (рис. 1) (Aswini, 2024). Общее количество параметров в модели достигает нескольких сотен миллионов, что требует значительных вычислительных ресурсов. Несмотря на то, что наибольшие успехи первоначально были достигнуты с 24-слойным BERT, часто возникали проблемы из-за ограниченных вычислительных мощностей. Однако данная проблема была решена с помощью улучшенных версий BERT (Chi et al., 2022; Araci, 2019; Liu et al., 2019; Lan et al., 2020; Yang et al., 2019; He et al., 2020; Sanh et al., 2019; Clark et al., 2020).

BERT использует контекстные вложения. Для каждого слова определяется фиксированное количество векторов вложения размером 768 измерений, которые служат входными данными модели. BERT выводит вектор с 768 параметрами для каждого слова или фразы на основе своих внутренних вычислений. Эти выходные последовательности становятся вложениями, представляющими предложение в контексте данных. Проще говоря, начальные входные данные в BERT представлены базовыми векторами, но после обработки через модель создаются контекстные векторы для каждого слова.

Модель включает части для форматирования входных данных и извлечения вложений. Выделенные токены, такие как [CLS] и [SEP], используются для обозначения начала и конца предложения соответственно. Токен [PAD] используется для дополнения, а [UNK] обозначает неизвестное слово. В слоях вложения включены токенизация, сегментация и позиционирование. Для токенизации в BERT обычно используется метод WordPiece. Сегментационное вложение учитывает семантические отношения между двумя предложениями, а вложение позиции сохраняет информацию о положении слова для создания последовательности слов.

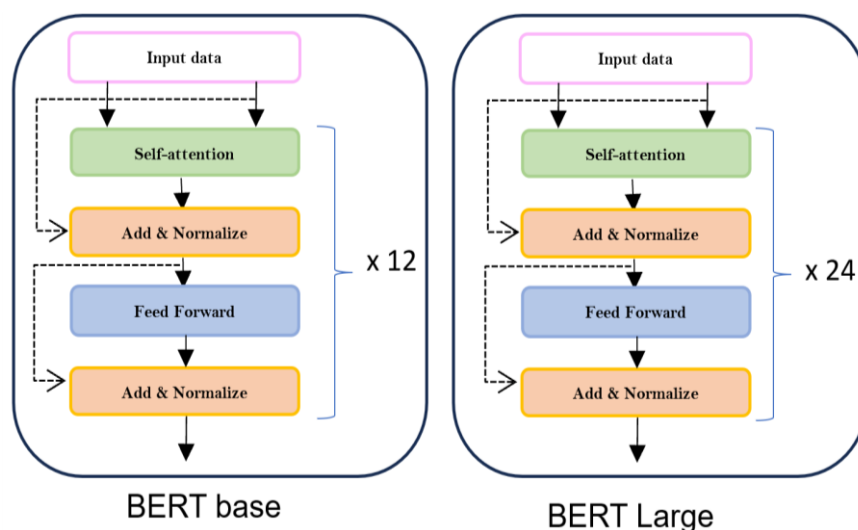


Рисунок 1. Архитектура BERT

Примечание – составлено автором на основе (Zhang, 2020)

Хотя BERT использует двунаправленное кодирование, его работа существенно отличается от рекуррентных нейронных сетей. Это происходит потому, что BERT отображает вложения позиций каждого токена на сегментационные вложения, чтобы представить свойства слова и его местоположение. Другими словами, достаточно форматировать входной текст с использованием вложенного слоя, и кодировщик предоставит соответствующий вывод.

Данные. Было решено создать сложную схему бинарной классификации, которая является основой для решения нашей задачи мультиклассификации. Этот подход позволил нам углубиться в нюансы категоризации текста, используя сильные стороны как сетей с длинной краткосрочной памятью (LSTM), так и моделей двунаправленного кодирования от трансформаторов (BERT), используемых в этой статье. Здесь мы подробно рассказываем о создании четырех бинарных меток классов и последующем процессе мультиклассификации, подчеркивая его значение и методологию.

Учитывая подробные описания именованных объектов (NE), мы разработали схему двоичной классификации, которая отражает аспект данных и разделяет их на две значимые категории. Принимая во внимание природу NE и контекст, в котором они, вероятно, будут использоваться, логическая бинарная классификация будет различать следующие виды:

1. Классификация чувствительности ко времени:

Содержит NE, которые обычно указывают на необходимость своевременного действия или внимания, например: 'DATE', 'TIME'.

2. Классификация организационного взаимодействия:

Предложения с NE, такими как 'ORGANISATION', 'CONTACT', 'LAW', 'MONEY' и 'FACILITY', которые предполагают взаимодействие с организациями или внутри них.

3. Классификация личной значимости:

Предложения, включающие личные имена ('PERSON'), должности ('POSITION') и контактную информацию ('CONTACT'), которые обычно встречаются в личных сообщениях.

4. Классификация коммерческих намерений:

Предложения, в которых упоминаются 'MONEY', 'PRODUCT', 'ORGANISATION' и 'CONTACT', указывают на потенциальную коммерческую деятельность или транзакции.

В рамках данного исследования были логически выбраны категории, созданные вручную, служащие в первую очередь для демонстрации функциональности метода. Однако наши будущие усилия направлены на автоматизацию создания классификационных тегов с использованием сложных алгоритмов, которые учитывают более широкий спектр NE внутри предложения и его контекстуальное значение. Это усовершенствование не только упростит процесс классификации, но также повысит точность и применимость задачи мультиклассификации при анализе текста на казахском языке.

В общей сложности используемый набор данных включает 110 675 последовательностей в наборах обучения, проверки и тестирования. Он богато аннотирован для детальной классификации текста, а его словарный запас превышает 72 000 слов. Примечательно, что в обучающем наборе обнаружено более 20 000 экземпляров, помеченных как «чувствительные ко времени», а также заметные значения для «организационного взаимодействия» (10 577), «личной значимости» (10 729) и «коммерческого намерения» (9 115). Такое справедливое распределение тегов имеет решающее значение для детального понимания и обработки NLP, предлагая прочную основу для продвижения задач классификации текста и распознавания именованных объектов в недостаточно представленных лингвистических исследованиях.

Препроцессинг. Для предварительной обработки текстовых данных было выполнено несколько шагов. Сначала данные были токенизированы с использованием WordPiece для модели BERT (из библиотеки Hugging Face Transformers). Для модели LSTM использовалась токенизация с применением NLTK. Это обеспечивало разделение текста на компоненты для дальнейшей обработки. Затем были удалены стоп-слова, лишняя пунктуация и специальные символы. Также была проведена лемматизация для приведения слов к их базовой форме. Этот шаг особенно важен для таких моделей, как LSTM, которые выигрывают от более стабильной структуры входных данных.

Результаты и их обсуждение. При оценке эффективности моделей NLP для классификации казахского текста мы использовали LSTM и BERT. Эти модели были протестированы на нашем подготовленном наборе данных с целью расшифровки сложной сети многомерных атрибутов, присущих тексту.

Параметры обучения моделей были выбраны для максимизации их производительности на валидационных данных и улучшения способности обрабатывать текстовые данные на казахском языке. Для модели LSTM использовались следующие параметры: количество эпох – 50, размер батча – 32, скорость обучения – 0.001, оптимизатор – Adam, функция потерь – кросс-энтропия, метод регуляризации – Dropout (0.5) и инициализация весов – He. Для модели BERT были выбраны следующие параметры: количество эпох – 5, размер батча – 16, скорость обучения – 2e-5, оптимизатор – AdamW, функция потерь – кросс-энтропия, а график изменения скорости обучения был настроен на линейный спад.

Для оценки производительности модели мы используем такие показатели, как точность и потери, которые легче интерпретировать в задачах классификации. Точность

измеряет процент правильно классифицированных объектов, что позволяет легко понять, насколько эффективна модель. Потери (например, кросс-энтропия) показывают разницу между предсказанными и реальными метками, что помогает оценить достоверность модели.

После того как мы установили двоичные метки для данных, исследование перешло к задаче мультиклассификации. В этой задаче тексту одновременно присваивается несколько меток. Это не просто определение одной категории, а понимание различных характеристик текста, которые могут быть полезны для классификации. Мы использовали модели LSTM и BERT для мультиклассификации, так как обе модели показали хорошие результаты в классификации текста. LSTM эффективно работает с долгосрочными зависимостями в данных, а BERT, основанный на архитектуре Transformer, лучше понимает контекст и связи между словами в тексте. Это сравнение стало ключевым для оценки их эффективности в обработке сложных текстов на казахском языке.

Результаты экспериментов, полученные с помощью графиков потерь и точности при обучении и проверке, дают убедительное представление о закономерностях обучения моделей:

1. Для LSTM потери при обучении резко снижались перед стабилизацией, в то время как потери при проверке испытывали колебания, что указывает на области, где обобщение модели можно улучшить (рис. 2). График точности для LSTM продемонстрировал достаточно заметный подъем к высоким уровням точности, что предполагает хорошее понимание задачи классификации.

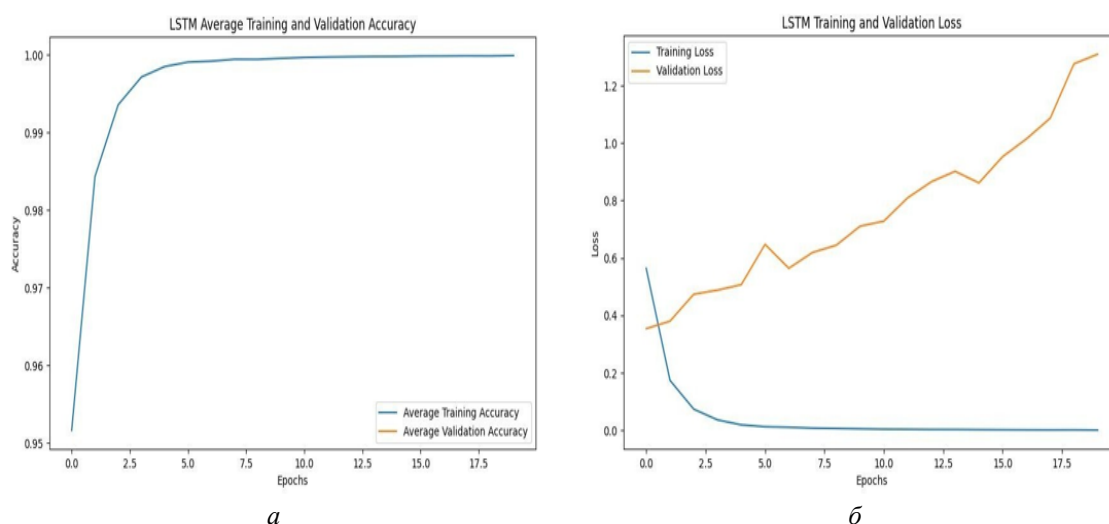


Рисунок 2. а – средняя точность обучения и проверки LSTM;
б – потеря обучения и проверки LSTM

Примечание – составлено автором

2. Производительность модели BERT, представленная на графиках потерь и точности (рис. 3), показала быстрое снижение потерь в процессе обучения, которое стабилизировалось с увеличением числа эпох. Это подтверждает, что модель эффективно обучается на предоставленных данных. График точности показывал высокие результаты на протяжении всего обучения, что свидетельствует о высокой надежности BERT в задачах классификации текста на казахском языке. В нашем сравнении модель BERT показала

лучшие результаты по сравнению с LSTM. BERT продемонстрировал отличные результаты в обработке сложных текстов казахском языке благодаря своей способности понимать контекст. Это подтверждается стабильным поведением на графиках потерь и точности.

Для более наглядного сравнения производительности моделей LSTM и BERT на обучающем и валидационном наборах данных результаты представлены в виде таблиц (табл. 1 и 2).

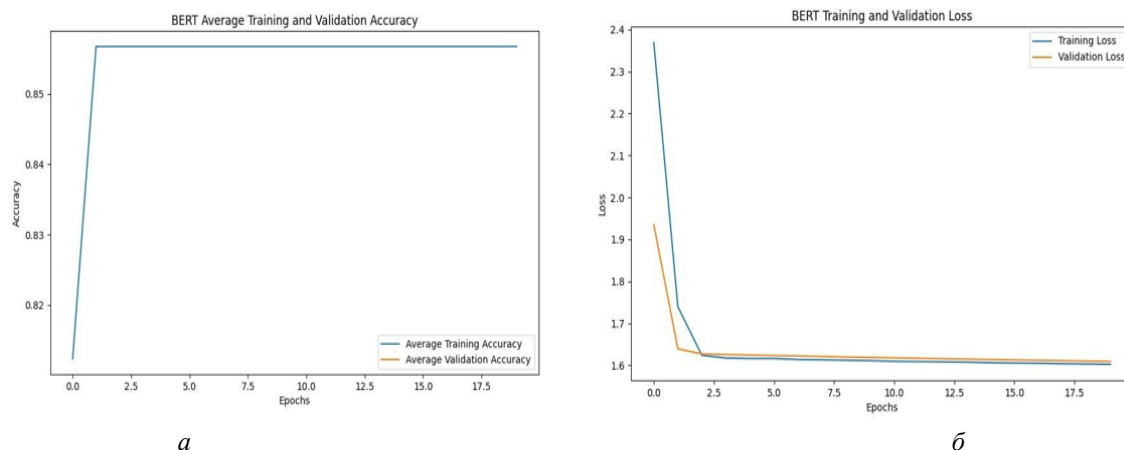


Рисунок 3. а – средняя точность обучения и проверки BERT;
б – потеря обучения и проверки BERT

Примечание – составлено автором

Таблица 1. Производительность моделей на обучающих данных

Метрика	LSTM	BERT
Потери	0,1993	0,0477
Точность (Accuracy)	0,4674	0,9255
Точность (Precision)	0,8453	0,9682
<i>Примечание – составлено автором</i>		

Таблица 2. Производительность моделей на валидационных данных

Метрика	LSTM	BERT
Потери	0,1993	0,0481
Точность (Accuracy)	0,4681	0,9202
Точность (Precision)	0,8524	0,9712
<i>Примечание – составлено автором</i>		

В процессе экспериментов были выявлены случаи, в которых модель LSTM показывала ошибки классификации, особенно при обработке сложных текстов с неочевидными контекстами. LSTM иногда не могла точно распознать временные метки, особенно в сложных предложениях с несколькими временными ссылками. А при наличии неструктурированной информации (например, имен) модель иногда путала контекст, что приводило к ошибочной классификации.

Для улучшения данной модели и лучшего распознавания временных меток и имен можно добавить дополнительные шаги в предобработку, такие как использование

внешних словарей для именованных сущностей. Можно использовать более мощные модели на основе трансформеров с улучшенной настройкой или подходы с использованием двухуровневого классификатора. Такие модели сначала детектируют сущности, а затем классифицируют их по категориям.

На графиках точности и потерь видно, что модель BERT стабильно улучшает точность в процессе обучения, что связано с его архитектурной особенностью, в то время как LSTM показывает некоторое колебание точности на валидационных данных. Это может указывать на проблему переобучения у LSTM, что проявляется в несоответствии между результатами на обучающем наборе и валидационном. BERT обладает двусторонним пониманием контекста, которое помогает модели правильно классифицировать сложные тексты.

Заключение. Внедрение системы из четырех двоичных меток и её применение в задаче мультиклассификации для анализа текстов на казахском языке представляет значительный прогресс в исследованиях NLP. Сравнивая модели LSTM и BERT в этом контексте, наша работа не только способствует пониманию эффективности моделей для недостаточно представленных языков, но и открывает новые возможности для практического применения NLP. Мы продемонстрировали, как модели LSTM и BERT могут быть эффективно развёрнуты в структуре мультиклассификации. Наши эксперименты подтвердили практичность и надёжность предложенной методологии в решении сложных задач многоклассовой классификации. Успех нашего подхода прокладывает путь для дальнейших улучшений, включая совершенствование модели BERT и развитие автоматической генерации меток классификации. Мы продолжаем работать над укреплением этого подхода, уделяя особое внимание созданию более надёжной системы генерации меток, способной максимально использовать потенциал BERT в различных приложениях NLP.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP19174298).

Список литературы

- Abibullayeva A.A., Kazbekova G.N., Zhunissov N.M. (2024). Keyword extraction from kazakh text with machine learning algorithms. Bulletin of the Abai KazNPU, the series of Physical and Mathematical Sciences, vol. 1(85), 106-113.
- Araci D. (2019). FinBERT: Financial Sentiment Analysis with Pre-trained Language Models. ArXiv, abs/1908.10063, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.10063>.
- Aswini R. (2024, August 31). How Does BERT NLP Optimization Model Work? <https://www.turing.com/kb/how-bert-nlp-optimization-model-works>.
- Bai X. (2018). Text classification based on LSTM and attention. 2018 Thirteenth International Conference on Digital Information Management (ICDIM), Berlin, Germany, 29-32, doi: 10.1109/ICDIM.2018.8847061.
- Bogdanchikov A., Ayazbayev D., Varlamis I. (2022). Classification of Scientific Documents in the Kazakh Language Using Deep Neural Networks and a Fusion of Images and Text. Big Data and Cognitive Computing, vol. 6(123), doi: 10.3390/bdcc6040123.
- Chi Z., Huang S., Dong L., Ma S., Zheng B., Singhal S., Bajaj P., Song X., Mao X.-L., Huang H., Wei F. (2022). XLM-E: Cross-lingual Language Model Pre-training via ELECTRA. In Proceedings of the 60th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, vol. 1, 6170–6182, doi: 10.18653/v1/2022.acl-long.427.
- Clark K., Luong M.-T., Le Q. V. Manning, C. (2020). ELECTRA: Pre-training Text Encoders as Discriminators Rather Than Generators. ArXiv: 2003.10555, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.10555>.
- Dogra V., Verma S., Kavita Chatterjee, P., Shafi J., Choi J., Ijaz M. F. (2022). A Complete Process of Text Classification System Using State-of-the-Art NLP Models. Computational Intelligence and Neuroscience, Article 1883698. <https://doi.org/10.1155/2022/1883698>.

- Garrido-Merchan, E. C., Gozalo-Brizuela, R., Gonzalez-Carvajal, S. (2023). Comparing BERT Against Traditional Machine Learning Models in Text Classification. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, vol. 2(4), 352–356. <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE3202838>.
- He P., Liu X., Gao J., Chen W (2020). DeBERTa: Decoding-enhanced BERT with Disentangled Attention. *ArXiv*, abs/2006.03654.
- Lan Z., Chen M., Goodman S., Gimpel K., Sharma P., Soricut R. (2020). ALBERT: A Lite BERT for Self-supervised Learning of Language Representations. *ArXiv*, abs/1909.11942, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.11942>.
- Liu Y., Ott M., Goyal N., Du J., Joshi M., Chen D., Levy O., Lewis M., Zettlemoyer L., Stoyanov V. (2019). RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. *ArXiv*, arxiv:1907.11692, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.11692>.
- Maheen S. M., Faisal M. R., Rahman Md. R., Karim Md. S. (2022). Alternative non-BERT model choices for the textual classification in low-resource languages and environments. In *Proceedings of the Third Workshop on Deep Learning for Low-Resource Natural Language Processing*, 192–202, doi: 10.18653/v1/2022.deepl-1.20.
- Mamyrbayev O., Oralbekova D. (2020). Modern trends in the development of speech recognition systems. *News of the National academy of sciences of the republic of Kazakhstan*, vol. 4, no. 332, 42-51. <https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.64>.
- Myrzakhmetov, B., Kozhirbayev, Zh. (2018). Extended Language Modeling Experiments for Kazakh. *International Workshop on Computational Models in Language and Speech*, vol. 2303, 35–43.
- Oralbekova D., Mamyrbayev O., Othman M., Kassymova D., Mukhsina K. (2023). Contemporary Approaches in Evolving Language Models. *Applied Sciences*, vol. 13(23):12901. <https://doi.org/10.3390/app132312901>.
- Sanh V., Debut L., Chaumond J., Wolf T. (2019). DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. *ArXiv*, arXiv:1910.01108.
- Yang Z., Dai Z., Yang Y., Carbonell J., Salakhutdinov R., Le Q.V. (2019). XLNet: generalized autoregressive pretraining for language understanding. *Proceedings of the 33rd International Conference on Neural Information Processing Systems*. Curran Associates Inc., Red Hook, NY, USA, vol. 517, 5753–5763, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.08237>.
- Yeshpanov R., Khassanov Y., Varol H. A. (2022). KazNERD: Kazakh Named Entity Recognition Dataset. *Proceedings of the 13th Conference on Language Resources and Evaluation (LREC 2022)*, European Language Resources Association, 20-25 June 2022, 417-426, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.13419>.
- Yu W., Yin L., Zhang C., Chen Y., Liu A. X. (2024). Application of Quantum Recurrent Neural Network in Low-Resource Language Text Classification. *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, vol. 5, no. 2100213, 1-13, doi: 10.1109/TQE.2024.3373903.
- Zhang A., Bohan L., Wang W., Wan S., Chen W. (2020). MII: A Novel Text Classification Model Combining Deep Active Learning with BERT. *Computers, Materials & Continua*, vol. 63, 1499-1514, <https://doi.org/10.32604/cmc.2020.09962>.

Information about authors

Oralbekova Dina – PhD, Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan, E-mail: dinaoral@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4975-6493, +7 771 131 01 88

Mamyrbayev Orken – PhD, Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan, E-mail: morkenj@mail.ru

Imansakipova Ayagoz – master of technical sciences, Almaty technological university, Almaty, Kazakhstan, E-mail: aimansakipova@bk.ru

Zhiger Aliya – master of technical sciences, Narxoz University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: alia_94-22@mail.ru

Mukhsina Kuralai – PhD, Institute of Information and Computational Technologies, Almaty, Kazakhstan, E-mail: email123@gmail.com



СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

ҚҰРЫЛЫС. СӘУЛЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА
CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_193
IRSTI 67.03.03

A.Z. Abu¹, A.S. Kabiye², U.S.Yerzhumanova³

T.K. Basenov Institute of Architecture and Construction, Satbayev University,
Almaty, Kazakhstan

¹E-mail: abu.asylkhan@mail.ru*

²E-mail: asylbek.140297@mail.ru

³E-mail: ulzhana.ys@gmail.com

CALCULATION OF FOUNDATION PRECIPITATION USING THE PLAXIS 2D PROGRAM

ІРГЕТАСТЫҢ ОТЫРУЫН PLAXIS 2D БАҒДАРЛАМАСЫ АРҚЫЛЫ ЕСЕПТЕУ

РАСЧЕТ ОСАДКИ ФУНДАМЕНТА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ PLAXIS 2D

Abstract. In this article, the layout of the building was calculated using the Plaxis 2D program. The building is a 5-storey business center located in Astana. The main purpose of the article is to clarify the progress of unloading loads on the foundation and a full explanation of the changes occurring in the foundation. When calculating a building, the calculation is considered in 5 stages. At the first stage, a protective wall of the pit is introduced. At the second stage, the pit is excavated to 1.5 meters and anchors are installed to ensure the stability of the protective wall. At the third stage, the pit is completely excavated. The total depth is 3 meters. At the fourth stage, a grillboard is laid, on top of which a load is applied to three floors of the building. At the fifth stage, the load on a full-fledged building is given. The full load on the building was removed from 5 floors. The most important difference of this report is the protective wall that will be installed in the pit. In an area where there are many buildings, there are many difficulties for carrying out construction work. One of them is geological heterogeneities caused by falling loads. This has a negative impact not only on buildings under construction, but also on neighboring buildings that have already been built. The protective wall ensures that when digging the foundation pit, the foundation will not crumble from the side and the course of construction will not have a negative impact on neighboring buildings. For this reason, a retaining wall is used.

Keywords: Building, Plaxis, load, foundation pit, retaining wall, pile, stage.

Аңдатпа. Бұл мақалада Plaxis 2d бағдарламасын қолдана отырып, ғимараттың отыруы есептелінді. Ғимарат Астана қаласында орналасқан 5 қабатты бизнес орталық. Мақаланың негізгі мақсаты, жүктемелердің іргетасқа түсіру барысын нақтылап көрсету және негізде пайда болатын өзгерістерді толықтай түсіндіру болып табылады. Ғимаратты есептеу барысында есеп 5 кезеңге бөліп қарастырылады. Бірінші кезеңде қазаншұңқырды қорғаушы қабырға енгізіледі. Екінші кезеңде қазаншұңқыр 1,5 метрге қазылып, қорғаушы қабырғаның орнықтылығын қамтамасыз ету үшін анкерлер орнатады. Үшінші кезеңде қазаншұңқыр толықтай қазылып болады. Жалпы тереңдігі 3 метр. Төртінші кезеңде растверк тақтасы төселініп, үстіне ғимараттың үш қабатының жүктемесі беріледі. Бесінші кезеңде толық ғимараттың жүктемесі беріледі. Толық ғимараттың жүктемесі 5 қабаттан түсірілген. Бұл есептің ең басты айырмашылығы қазаншұңқарда қойылатын қорғаушы қабырға болып келеді. Ғимараттар көп салынған аймақта құрылыс жұмысын жүргізудің көптеген қиыншылықтары бар.

Солардың бірі, түсірілген жүктемелердің әсерінен пайда болатын геологиялық гетерогенділік. Ол өзерістер салынып жатқан ғимараттарға ғана емес, көрші тұрған, салынып біткен ғимараттарға кері әсер етеді. Қорғаушы қабырға қазаншұңқыр қазу барысында, негіздің жан-жақтан төгілмеуін және құрылыс барысы көрші ғимараттарға кері әсерін тигізбеуін қамтамасыз етеді. Сол себепті қорғаушы қабырға қолданылады. Есепте жалпы түсетін жүктемелің әсерінен ғимарат қаншылықты отыратыны есептелінеді, сонымен қоса қорғаушы қабырғаның пайдасы да түсіндіріледі. Мақала негізгі бөлімнен, оның ішінде бағдарламамен шығарылған есептің қорытындылары көрсетілген. Соңында жұмыс жалпы қорытындыланып жазылған. Есептің мәні толықтай қанағаттандырылды.

Түйін сөздер: Ғимарат, Plaxis, жүктеме, қазаншұңқыр, тіреуші қабырға, қада, кезең.

Аннотация. В этой статье была рассчитана планировка здания с использованием программы Plaxis 2D. Здание представляет собой 5-этажный бизнес-центр, расположенный в городе Астана. Основной целью статьи является уточнение хода разгрузки нагрузок на фундамент и полное разъяснение изменений, происходящих в основании. При расчете здания расчет рассматривается в 5 этапов. На первом этапе вводится защитная стена котлована. На втором этапе котлован выкапывают на 1,5 метра и устанавливают анкеры для обеспечения устойчивости защитной стены. На третьем этапе котлован полностью выкапывается. Общая глубина 3 метра. На четвертом этапе укладывается доска ростверка, поверх которой подается нагрузка на три этажа здания. На пятом этапе дается нагрузка на полноценное здание. Полная нагрузка на здание была снята с 5 этажей. Самым главным отличием этого отчета является защитная стена, которая будет установлена в котловане. В районе, где много построек, есть много трудности для проведения строительных работ. Одним из них являются геологические неоднородности, вызванные падающими нагрузками. Это негативно сказывается не только на строящихся зданиях, но и на соседних, уже построенных зданиях. Защитная стена гарантирует, что при рытье котлована основание не будет осыпаться со стороны и ход строительства не окажет негативного влияния на соседние здания. По этой причине используется подпорная стена.

Ключевые слова: Здание, Plaxis, нагрузка, котлован, подпорная стена, свай, этап.

Introduction. The Plaxis 2D software was used to analyze the settlement of the building. The building is a 5-story business center located in Astana city.

The settlement analysis divides the assessment into 5 phases. The calculation was carried out in five steps to see the weight of the process in detail. In the first phase, sand cushion is placed under the foundation. In the second phase, the sand cushion settles to a depth of 1.5 meters, and anchors are installed to stabilize the foundation. In the third phase, the settlement of the sand cushion is completed. The total width is 3 meters. In the fourth phase, a raft foundation slab is constructed, supporting the loads of the building's three floors. In the fifth phase, the full load of the entire building is applied. The total load of the building is distributed over 5 floors.

The main peculiarity of this analysis is the sand cushion placed under the foundation.

The construction of buildings in heavily developed areas poses many challenges. One of them is geological changes caused by the effects of imposed settlements. The analysis evaluates how effectively the building withstands the overall settlement load (Dudchenko, A.V., Dias, D., Kuznetsov, S.V., 2021).

Materials and methods of research. The settlement of the building is analyzed using the Plaxis 2D software. Mohr-Coulomb soil model was used in the paper. This program allows dividing the work into phases and observing fundamental changes at each stage.

The initial settlement is calculated based on the total load. The program automatically accepts a width of 1 meter for the building's settlement. It is necessary to match the chosen part of the structure of the 5 floors already planned. It is possible to increase the total load for all 5 floors in a comprehensive manner. In our case, the standard building is displayed in a shade from the KZ KNGE show.

Table 1. The total load for all floors

Floor	From the basement and garage		Calculation of the roof's structural capacity N_k	Calculation of loads addition		Overall
	N_p t	N_f t		N_e t	N_f t	
5	34,52	4,4	13,5	48,02	4,4	52,42
4	64,49	9,04	27	94,49	9,04	103,53
3	94,46	13,68	40,5	134,96	13,68	148,64
2	124,43	18,32	54	178,43	18,32	196,75
1	154,4	22,96	67,5	221,9	22,96	244,86
Foundation	184,37	27,6	79,38	263,75	27,6	291,35
Beam				6,5		300

Note – compiled by the authors

Total load applied from all floors was 300 tons. This load is transferred to the foundation raft.

The markers indicating the beams supporting the foundation are shown in table 2. However, the markers for anchors are provided in table 3. Markers for borders are indicated in table 4.

Table 2. Beam supporting the foundation

Indicators	Designation	Value	Unit of measurement
Type of use	Material type	Elastic	
Standard precision	EA	$1,2 \cdot 10^6$	$\kappa\text{N/m}$
Accuracy of measurement	EI	$1,2 \cdot 10^5$	$\kappa\text{Nm}^2/\text{m}$
Equivalent thickness	d	0,346	m
weight	w	8,3	$\kappa\text{N/m/m}$
Poisson's ratio	-	0,15	-

Note – compiled by the authors

Table 3. Anchors installed in the beam supporting the foundation in the basement

Indicators	Designation	Value	Unit of measurement
Type of use	Material type	Elastic	
Standard precision	EA	$2 \cdot 10^6$	κN
Anchor assembly	L_s	2,5	m
Maximum bearing capacity	$F_{\max, \text{comp}}$	$1 \cdot 10^{15}$	κN
	$F_{\max, \text{tens}}$	$1 \cdot 10^{15}$	κN

Note – compiled by the authors

Based on the type of soil, we determine the foundations. The foundations settle 9 meters in the eastern part of the building, but only 7 meters in the remaining part. This difference is due to the thickness of the level of the ground that does not settle. Therefore, our approach correctly addresses the non-settling layer of soil. This prevents significant settlement of the building (Miranda, L.Caldeira, L., Serra, J. B.Gomes, R.C., 2023).

Table 4. Markers of the boundaries

Indicators	Designation	Value	Unit of measurement
Type of use	Material type	Elastic	
Standard precision	EA	$2,7 \cdot 10^6$	$\kappa\text{N/m}$
Accuracy of measurement	EI	20250	$\kappa\text{Nm}^2/\text{m}$
Equivalent thickness	d	0,3	m
weight	w	16	$\kappa\text{N/m/m}$
Poisson's ratio	-	0,2	-
<i>Note – compiled by the authors</i>			

The work is divided into stages:

In the first stage, the area to be analyzed is marked in the software, and it is segmented into layers of soil. The average depth of groundwater is determined to be 3 meters. This information is obtained from geodetic surveys. After entering the soil type, proceed to the location where the sand cushion is placed. Install anchors to support the foundation. The protective beam has indicators in table 2. It is made of reinforced concrete. It is protected from all sides of the place where the sand cushion is located during installation to prevent soil movement during the sand cushion operation.

Additionally, loads from vehicles and people are applied to the rear side of the protective beam of the sand cushion.

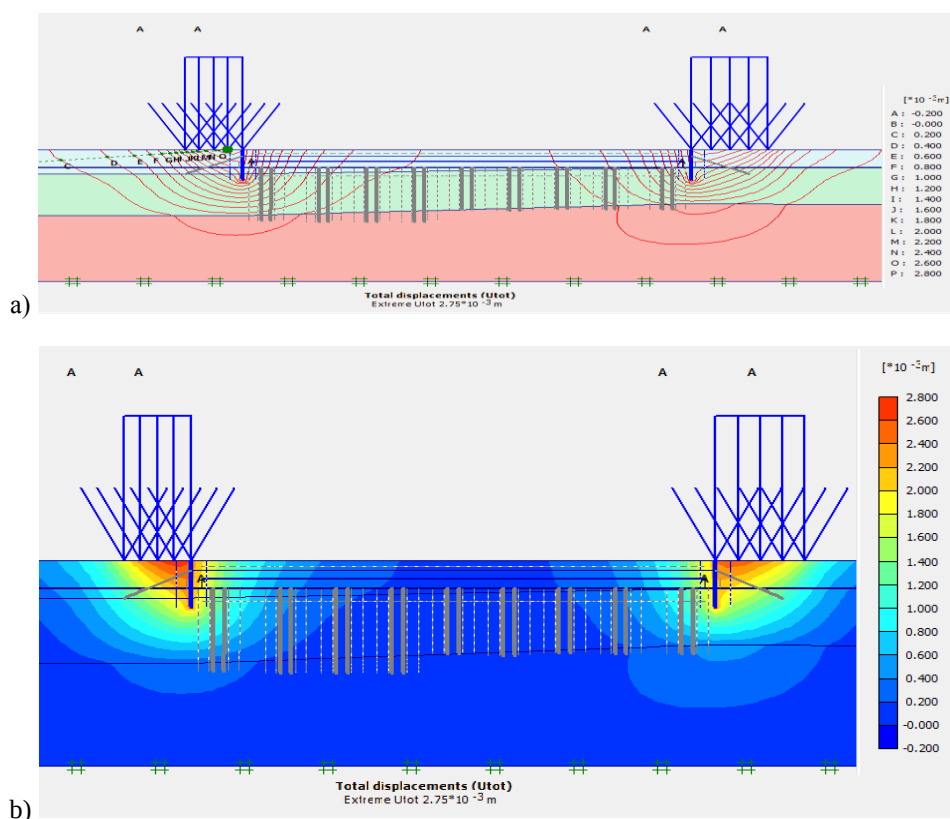


Figure 1. The contour of the base in the isometric view: a – contour indicated by contour lines;
b – contour indicated by colors

Note – compiled by the authors

After the installation of the protective beam in the second phase, the excavation work begins. During this phase, the excavation settles up to 1.5 meters, and anchors are installed to stabilize the position of the protective beam. The length of the anchor is 7 meters. At the head of the anchor, there is a cement section with a length of 3 meters. The anchor has markers in table 3.

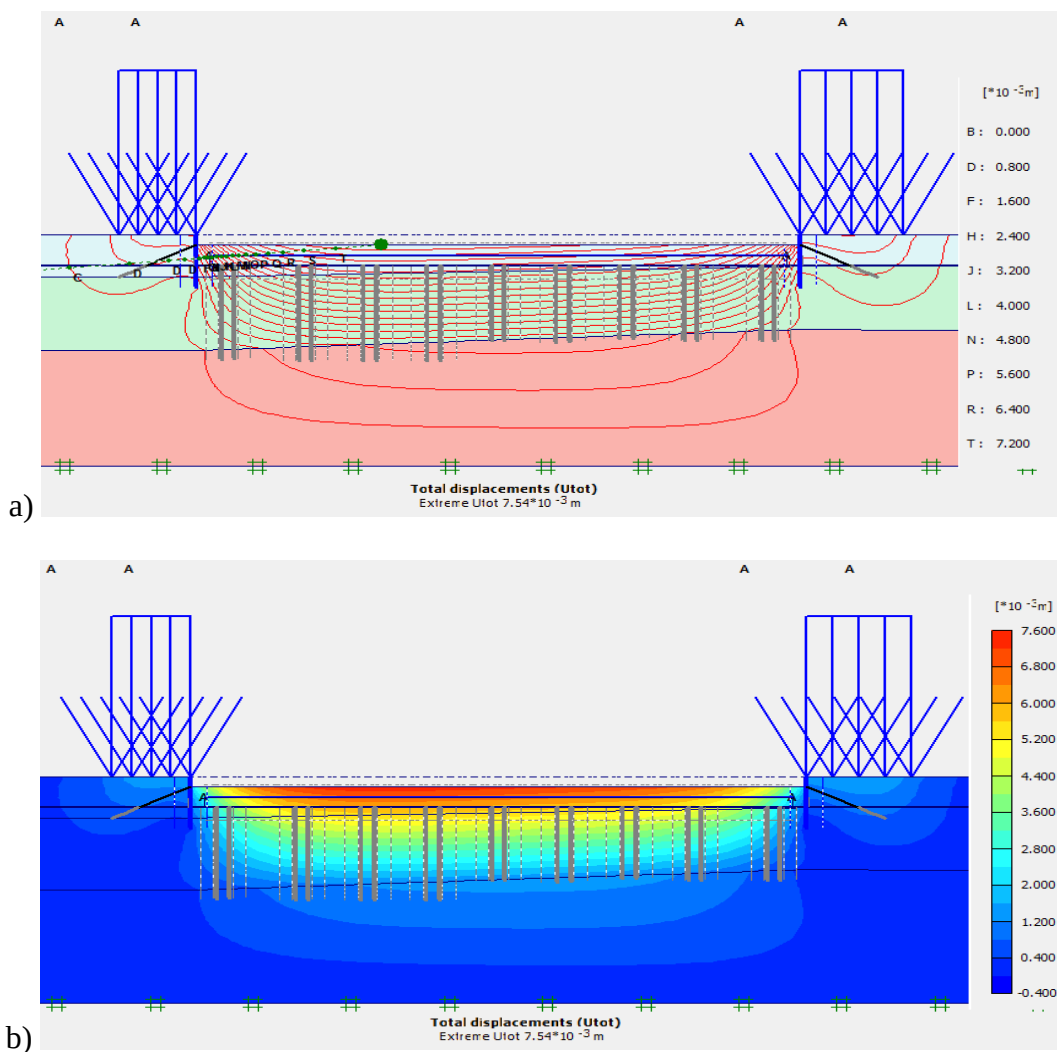


Figure 2. The slope of the base in the contour:

a - slope indicated by contour lines; b - slope shown by colors on the contour

Note – compiled by the authors

In the third phase, the excavation is carried out to the full depth. Moreover, there is no need to worry about any disturbances during excavation because the excavation pit is protected by guardrails. It is also secured with anchors. The excavation reaches a depth of 3 meters, which is the level required for us. After reaching this point, we will proceed to install the supports. It has markers on the 4 schedule. There are 18 entries in the account. After the schedule is completed, the head of the building's slab must be cleaned and the reinforcement opened. Then the formwork is installed on top.

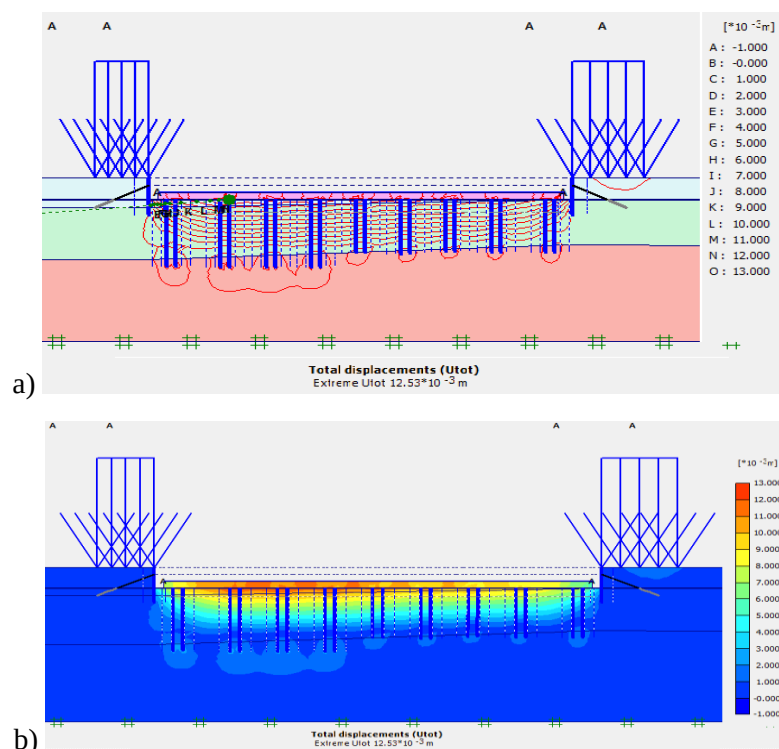


Figure 3. The outline of the foundation in the isometric view: a – the step indicated by dashed lines in the isometric view; b – the step illustrated by colors in the isometric view
Note – compiled by the authors

In the fourth phase, the roof slab of the building is placed

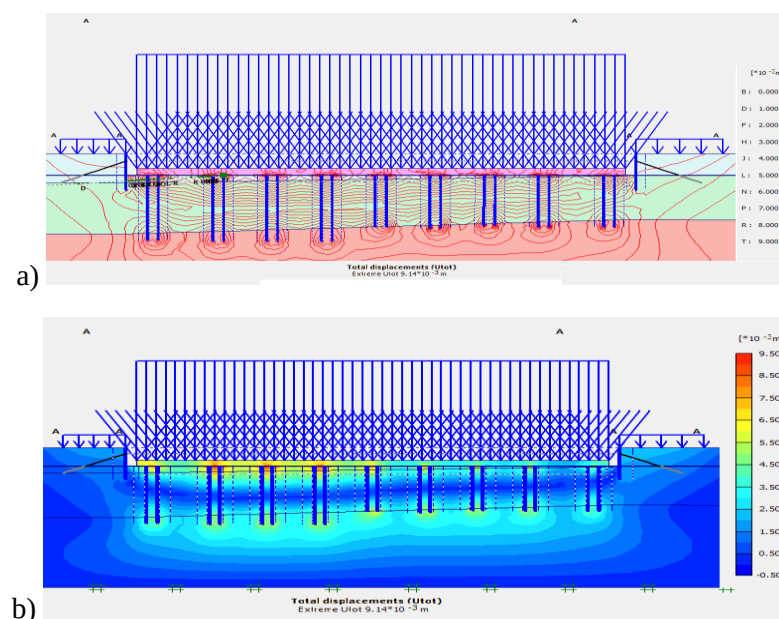


Figure 4. The outline of the foundation in the isometric view: a – the step indicated by dashed lines in the isometric view; b – the step illustrated by colors in the isometric view
Note – compiled by the authors

In the fifth phase, we take the full load of the building. The load of the fifth floor is indicated on the first schedule. The total additional load is 300 tons. It is divided equally per square meter according to the complete program.

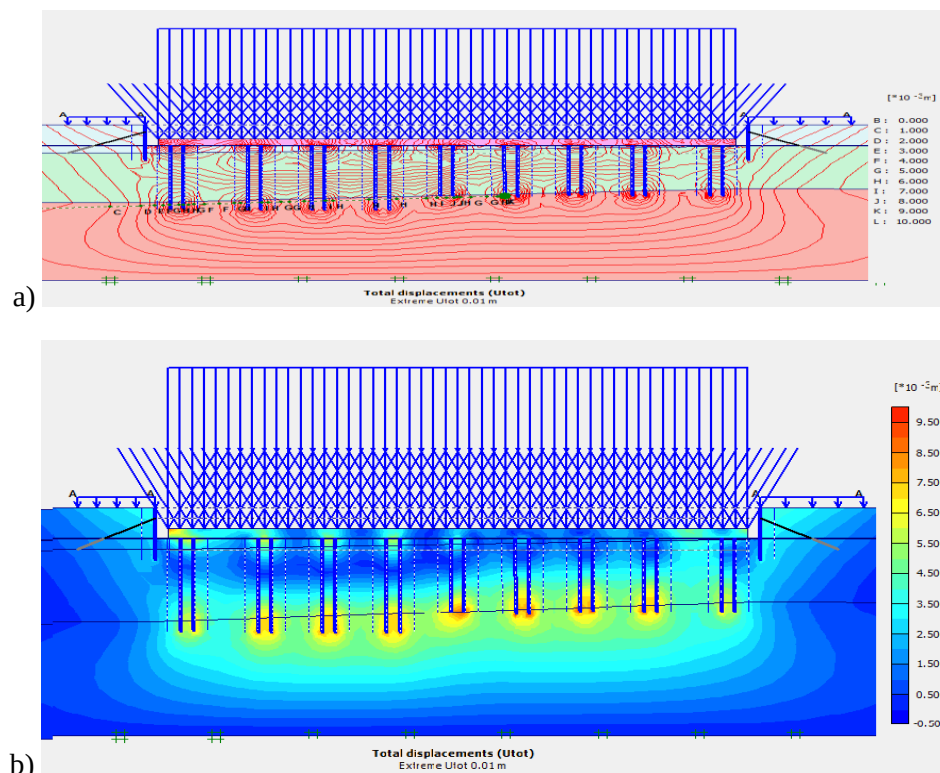


Figure 5. The outline of the foundation in the isometric view: a – the step indicated by dashed lines in the isometric view; b – the step illustrated by colors in the isometric view

Note – compiled by the authors

Results and discussion. In Figure 1, the soil settles uniformly by 0.275 cm during the initial phase. (a – The settlement value is indicated in Figure 1. b – In Figure 1, the settlement value is higher in red color, but there is no settlement in blue color.)

In Figure 2, the step of the soil in the first phase has disappeared. This is because we anchored the anchor to the ground. However, in the second phase, the average step of the earthquake completely moves to 0.754 cm. a – indicates the value of the step in Figure 2. b – The comparative value of the step in Figure 2 is higher in red, but there is no step in blue.

In Figure 3, due to the influence of the third phase, the soil column and the slab will move by 1.253 cm.

In Figure 4, due to the influence of the fourth phase, the top of the foundation slab moves by 0.914 cm after applying a load of 3 floors.

In Figure 5, after applying the full load of the building onto the foundation slab in the fifth phase, it settles by 1 cm.

From figure 4 and 5, it can be seen how the load acts on the foundation. Since the paper deals with foundation settlement, the collection of loads has been pre-collected and the total load is already used in Plaxis 2D.

Conclusion. In conclusion, the report is fully satisfied. It was found to be the right decision to use such a construction system during construction works in the city.

It was made based on the geological research of the city of Astana. Every situation has to be taken into consideration as construction works are going on in the city every day. Retaining wall is an important part of earthworks. Retaining walls were used in the city to ensure reliable progress of earthworks. The retaining wall prevents the collapse of the excavation soil.

The influence of groundwater is considered in Plaxis 2D. In this article it is considered under the excavation.

Plaxis 2d loads were displayed at each stage. The values of each period are shown. At the end, the conclusion of the general report appeared. According to the calculated loads, the retaining wall, pile and base perform satisfactorily.

When preparing this work, the authors did not use AI tools.

References

- Boris Ivanovich Kulachkin, Alexander Alexandrovich Mitkin, Alexey Ivanovich Radkevich, Dmitry Petrovich Matyukhin, Valeria Konstantinova Vasyuta (2017) Fundamentals of geotechnical and soil mechanics, 153-166, <https://doi.org/10.12737/23206>
- Dmitry, Ch.U, Natalia, M.L., Irina, M.Y. (2020). Foundations, retaining walls and pit fences [Fundamenty, podpornye steny i ograzhdeniya kotlovanov] (In Russ.).
- Dudchenko, A.V., Dias, D., Kuznetsov, S.V. (2021). Vertical wave barriers for vibration re-duction. Archive of Applied Mechanics, 91, 257–276. <https://doi.org/10.1007/s00419-020-01768-2>
- Ground anchors. (2023). [Gruntovyje ankery] Retrived from: <https://vinto-svai.ru/> (In Russ.).
- Isakov Galym Isabaevich, Bekbasarov Isabai Isakovich. Baytemirov Mukhan Nazarovich. Atenov Yerlan Imngalievich (2016) Features and disadvantages of evaluation methods for piles bearing capacity based on the results of tests of their models, 91-99, <https://doi.org/10.12737/19675>
- Kaloshina Svetlana Valentinovna, Zagitdinova Tatyana Vakhitovna (2018) Methods of strengthening soils in construction, 13-17, https://doi.org/10.29039/article_5abc8ca264de41.35773874
- Kondratov, A. B. (2005). Resin-injection soil stabilization techniques used in underground construction carried on in big cities in Russia. Underground Space Use: Analysis of the Past and Lessons for the Future [Tekhnologii stabilizatsii grunta putem in'ekcii smoly, primenyaemye pri podzemnom stroitel'stve, prodolzhayut primenyat'sya v krupnyh gorodah Rossii] – Proceedings of the 31st ITA-AITES World Tunnel Congress, 2. <https://clck.ru/3DPk33> (In Russ.).
- Kozhushko V.P., Krasnovsk S.N.. (2020) Analysis of the work of a hard-to-use stench in cooperation with the ground analiz-raboty-ugolkovoy-podpornoy-stenki-pri-vzaimodeystvii-ee-s-gruntom.pdf
- Maxim Petrovich Matvienko, Vladimir Petrovich Dyba, Valentina Vasilievna Ilyinova (2017) Comparison effect of the method of calculation of foundation on the first limit state, 25-29, <https://doi.org/10.12737/24580>
- Mikhail, B.V. (2011). Foundations and foundation [Osnovaniya i fundamenty] (In Russ.)
- Miranda, L. Caldeira, L., Serra, J. B. Gomes, R. C. (2023). Geotechnical characterization of a novel material obtained by injecting a closed cell expansive polyurethane resin into a sandmass. Transportation Geotechnics. T. 42. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.101051>
- Nuikin Sergey Sergeevich (2015) Installation of reinforced concrete piles by pressing into clay soils in cramped construction conditions <https://doi.org/10.12737/16055>
- Pavel Konstantinovich Gavrilov, Glukhov Vyacheslav Sergeevich (2021) Assessment of the bearing capacity of piles during static load test, 22-27, <https://doi.org/10.29039/2308-0191-2020-8-4-22-27>
- Ter-Martirosyan Zaven, Ter-Martirosyan Armen (2015) Interaction of long pile finite stiffness with the broadening heel and the surrounding soil, 79-86 <https://doi.org/10.12737/14963>
- Yevtushenko Sergey Ivanovich, Volkov Vladimir Sergeevich (2017) Calculation methods of retaining walls – brief review of publications, 162-168, https://doi.org/10.12737/article_59cd0437899de0.00397357

Information about authors

Abu Asylkhan Zairkhanuly – master of technical sciences, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: abu.asylkhan@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9374-787X, +7 708 815 23 01

Kabiyev Assylbek Serikovich – master of technical sciences, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: asylbek.140297@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4340-5564, + 7 707 881 48 46

Yerzhumanova Ulzhan – master of technical sciences, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: ulzhana.ys@gmail.com, ORCID: 0009-0001-2981-0811, +7 776 088 15 88

ҚҰРЫЛЫС МАТЕРИАЛДАРЫ ЖӘНЕ БҰЙЫМДАРЫ
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_201
MFTAA 67.09.43

Д.Н. Галымжанова¹, А.Ж. Тілекқабыл², М.Ж. Ескалиев¹,
Н.А. Сактаганова³, А.У. Жапахова³

¹«Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті» КеАҚ,
Орал қ, Қазақстан

E-mail: diko_96@bk.ru*

E-mail: eskaliev-1991@mail.ru

²ХББК Қазақ бас сәулет-құрылыс академиясы, Алматы қ., Қазақстан

E-mail: kanbabina@mail.ru

³Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда қ., Қазақстан

E-mail: amanovna.75@mail.ru

E-mail: zhapakhova@mail.ru

ӨЗДІГІНЕН НЫҒЫЗДАЛАТЫН БЕТОННЫҢ ҚАСИЕТТЕРІНЕ
ТАБИФИ ЦЕОЛИТТЕРДІҢ ӘСЕРІ

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ ЦЕОЛИТОВ КАК НАПОЛНИТЕЛЯ
НА СВОЙСТВА САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

EFFECT OF NATURAL ZEOLITES ON THE PROPERTIES
OF SELF-COMPACTING CONCRETE

Аңдатпа. Мақалада Қазақстанның жергілікті шикізаттарын, атап айтқанда табиғи цеолиттер мен тас ұнтағын өздігінен нығыздалатын бетондар (ӨНБ) үшін минералды толтырғыш ретінде қолданудың тиімділігі зерттелген. Зерттеу Алматы маңындағы Чанканай кен орнынан алынған цеолит және Балтабай-1 кен орнынан алынған тау жыныстарының қиыршықтары негізінде жүргізілді. Эксперименттер бетон қоспаларының реологиялық және беріктік қасиеттеріне түрлі минералды қоспалардың әсерін анықтауға бағытталды. Нәтижелер көрсеткендей, цеолиттің 7%-ға дейінгі мөлшерін қосу бетонның беріктігін 80 %-ға арттырып, оның ағындылық қасиеттеріне теріс әсер етпей, су бөлінуін болдырмады.

Сонымен қатар, тас ұнтағы мен цеолиттің үйлесімді қолданылуы бетонның беріктігін 70 МПа дейін арттырды, бұл өздігінен нығыздалатын бетондарға қойылатын талаптарға толық сәйкес келеді. Бұл зерттеу Қазақстандағы жергілікті минералды ресурстарды пайдалану арқылы экологиялық және экономикалық тұрғыдан тиімді, жоғары сапалы өздігінен нығыздалатын бетондардың өндірісін дамыту мүмкіндігін көрсетеді. Зерттеу барысында бетон қоспаларының әртүрлі минералды толтырғыштармен оңтайлы пропорциялары анықталып, олардың тұтқырлық пен ағындылық қасиеттерін реттеу арқылы бетонның сапасы артты. Бұл өздігінен нығыздалатын бетондардың құрылыс саласындағы тиімділігін арттырып, қолжетімділігі мен экологиялық тиімділігін күшейтуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар, зерттеу барысында алынған деректер Қазақстандағы жергілікті шикізаттарды қолдану арқылы құрылыс материалдарының сапасын жақсартуға ықпал ететін жаңа әдістерді енгізуге жол ашады. Осылайша, жаңа технологияларды енгізу құрылыс индустриясын жаңарту мен оның тұрақтылығын арттыруға ықпал етеді. Болашақта бұл қоспалардың басқа бетон түрлеріне әсері зерттеліп, құрылыс саласында кеңінен қолданылуы күтілуде.

Түйін сөздер: табиғи цеолит, тас ұнтағы, өздігінен нығыздалатын бетон, минералды қоспалар, беріктік, реологиялық қасиеттер, қоспалардың мөлшері.

Аннотация. В статье исследована эффективность использования местных сырьевых материалов Казахстана, а именно природных цеолитов и каменной муки, в качестве минеральных наполнителей для самоуплотняющихся бетонов (СУБ). Исследование проводилось на основе цеолита, добытого на месторождении Чанканай в окрестностях Алматы, и гравия,

полученного на месторождении Балтабай-1. Эксперименты были направлены на определение влияния различных минеральных добавок на реологические и прочностные характеристики бетонных смесей. Результаты показали, что добавление до 7% цеолита увеличивает прочность бетона на 80 %, не оказывая негативного воздействия на его текучие свойства и предотвращая выделение воды.

Кроме того, совместное использование каменной муки и цеолита повысило прочность бетона до 70 МПа, что полностью соответствует требованиям к самоуплотняющимся бетонам. Это исследование демонстрирует возможность разработки экологически и экономически эффективных высококачественных самоуплотняющихся бетонов с использованием местных минералов Казахстана. В ходе исследования были определены оптимальные пропорции различных минеральных наполнителей, что позволило эффективно регулировать вязкость и текучесть бетона. Это повышает эффективность самоуплотняющихся бетонов в строительстве, улучшая их доступность и экологическую эффективность. Кроме того, полученные данные открывают новые методы улучшения качества строительных материалов с использованием местных сырьевых ресурсов Казахстана. В дальнейшем планируется изучение влияния этих добавок на другие типы бетонов, что обеспечит их широкое применение в строительной отрасли.

Ключевые слова: природный цеолит, каменная мука, самоуплотняющийся бетон, минеральные добавки, прочность, реологические свойства, дозировка добавок.

Abstract. This article investigates the effectiveness of using local raw materials from Kazakhstan, namely natural zeolites and stone powder, as mineral fillers for self-compacting concretes (SCC). The study was based on zeolite obtained from the Chankanai deposit near Almaty and gravel from the Baltabay-1 deposit. The experiments aimed to determine the impact of various mineral additives on the rheological and strength properties of concrete mixtures. The results showed that adding up to 7% zeolite increased the strength of concrete by 80%, without negatively affecting its flow properties and preventing water separation.

Furthermore, the combined use of stone powder and zeolite increased the concrete strength to 70 MPa, fully meeting the requirements for self-compacting concretes. This research demonstrates the potential for developing environmentally and economically efficient, high-quality self-compacting concretes using Kazakhstan's local minerals. The study identified the optimal proportions of different mineral fillers, which effectively controlled the viscosity and flowability of the concrete. This enhances the performance of self-compacting concretes in construction, improving their accessibility and environmental efficiency. Additionally, the findings open new ways to enhance the quality of building materials using Kazakhstan's local raw materials. Further research is planned to investigate the effects of these additives on other types of concrete, which will ensure their widespread use in the construction industry.

Keywords: natural zeolite, stone dust, self-compacting concrete, mineral additives, strength, rheological properties, additive dosage.

Кіріспе. Өздігінен нығыздалатын бетон (ӨНБ) – бұл қосымша сыртқы нығыздаушы энергияның әсерінсіз, тек өз салмағының әсерінен ағып, ішіндегі ауадан босап, арматура торлары мен қалып арасындағы кеңістікті толығымен толтыратын бетон. Өздігінен нығыздалатын бетонда вибрациялық бетон сияқты қалдық пор көлемі болуы мүмкін (DAFSTB-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), 2003). Алайда қазіргі уақытқа дейін мұндай бетондардың ерте мерзімдерде қалыптан шығу беріктігін қамтамасыз ету мәселесі өзектілігін сақтап отыр, әсіресе зауыттық технологиялар үшін. ӨНБ-нің ұзақ уақыт бойы қатаюы ТВО қолданбай, қалыптардың айналым мерзімдерін ұлғайтады және тіпті кәсіпорынның орташа қуаттылығын қамтамасыз етуге мүмкіндік бермейді (Zhiwei Qian, 2017). (Bolotskih O.N., 2008) мақалада өздігінен нығыздалатын бетон қоспалары мен бетонының негізгі қасиеттері зерттеліп, ӨНБ диагностикасы үшін қолданылатын негізгі жабдықтар көрсетілген. Поликарбоксилат негізіндегі қоспалар туралы ақпарат, оларды өздігінен нығыздалатын бетон қоспаларын өндіруде қолдану, сондай-ақ поликарбоксилаттардың химиялық қасиеттері, бетон қоспасына әсері, қоспаларды қолданудың артықшылықтары мен кемшіліктері, сондай-ақ құрылыс саласында қолдану перспективасы (Vovk A.I., 2012) мақалаларында қарастырылған. (Barabanshchikov Yu.G., 2014) мақаласында С-3 суперпластификаторын құйма бетон

қоспалары үшін қолдану туралы ақпарат берілген. Ал (Okamura H., 2003) мақалаларында Жапония, Еуропа және Ресейдің құрылыс алаңдарында өздігінен нығыздалатын бетонды қолдану мысалдары көрсетілген.

Ұсақ дисперсті минералды компоненттерді қолданудың тиімділігі жоғары байланыс-қыштық қасиеті бар өздігінен нығыздалатын бетонда цементтің бір бөлігін ауыстыру мүмкіндігімен анықталады, бұл бетон қоспаларының тұрақтылығын төмендетеді (Urban M., 2018) және кәдімгі бетонмен салыстырғанда экономикалық тиімділікті қамтамасыз етеді. Осыған байланысты төмен цементті құрамды ӨНБ (SCC with low-cement) болашақ зерттеулердің маңызды міндеттерінің бірі болып табылады. Минералды толтырғыштарды цементтің бір бөлігін ауыстыру үшін қолдану, талап етілетін қасиеттерге қол жеткізу ғана емес, экономикалық тұрғыдан тиімді болумен қатар, экологиялық мәселелерді шешуде де маңызды: энергия тұтыну мен жылыну газдардың (CO₂) атмосфераға шығарылуын азайтуға ықпал етеді (Derepko S.N., 2015).

(Leung H.Y., 2016) зерттеуінде ұшқыш күл мен кремний диоксидінің буы бар өздігінен нығыздалатын бетонның сорбциялық қабілеті зерттелген. Тестілеу нәтижелері ұшқыш күл мен кремнезем буының болуы бетонның беткі су сіңірімділігін су мен байланыстырғыштың қатынасы 0,38 кезінде айтарлықтай төмендететінін көрсетеді. Ұшқыш күл мен кремнезем буын қосу жалпы алғанда 28 күнде бетон кубының беріктігін арттырады. Дегенмен, қысу беріктігі мен қол жеткізілген сорбциялық қабілет арасында ӨНБ-де корреляция жоқ. Басқа зерттеуде (Wang H.Y., 2013) өздігінен нығыздалатын жоғары шлакобетонның жаңа және инженерлік қасиеттері зерттелген. Бұл зерттеуде су-цемент қатынасы 0,37 тұрақты болған жағдайда, цементтің бір бөлігі 0 %, 15 % және 30 % арақатынасымен пеш шлағы мен ауыстырылған өздігінен нығыздалатын бетонның қасиеттері зерттелген. Жаңа және әртүрлі инженерлік қасиеттер талқыланған. Нәтижелер пеш шлағының портландцементпен ауыстыру коэффициентіне байланысты шөгінді ағыны өзгергенін көрсетті. 15 %-дық пеш шлағымен алынған үлгінің шөгінді ағыны жобалық мәні 550-700 мм аралығында болды. 15 %-дық пеш шлағы ауыстырылған үлгінің қысу беріктігі бақылау тобынан жоғары болды. Қосылған шлак мөлшері артқан сайын кебу ұлғайды. (Fan T.V., 2013) зерттеуінде микрокремнеземмен бірге ӨНБ құрамында күріш қабығын жағу күлін қолдану тәжірибесі белгілі. Олардың ӨНБ құрамына енгізілуі бетонның қысу беріктігінің шегін 70 %-ға, бетонның икемділік модулін 15 %-ға арттырады, бетонның жылжу өлшемі тең күшті бетонға қарағанда 0,44-тен 1,19-ға дейін артады, тартылу бойынша кебу шөгуін 30 %-ға дейін азайтады, бұл темірбетонның ерте жарықшаққа төзімділігіне оң әсер етеді, бірақ кебу кезінде шөуге practically әсер етпейді.

Қазіргі зерттеулер негізінен цеолиттің және басқа минералды толтырғыштардың бетонның жеке қасиеттеріне әсерін зерттеуге бағытталған: не беріктіктің артуы, не қоспаның ағып кету қасиетінің жақсаруы. Дегенмен, цеолиттің цементті матрица мен қоспаның реологиялық қасиеттерімен өзара әрекеттесуіне әсерін зерттейтін кешенді зерттеу әлі жеткіліксіз жүргізілген. Сондай-ақ, цеолиттің әртүрлі пропорциялармен енгізілуі бастапқы қатайту кезеңінде жеткілікті беріктікке қол жеткізіп, қоспаның қозғалғыштығының нашарлауын болдырмауға қалай әсер ететіні анық емес. Осыған байланысты, жергілікті минералды ресурстарды пайдалану кезінде беріктік пен реологиялық қасиеттер арасындағы теңгерімді қамтамасыз ететін, цеолит қосылған ӨНБ-нің оптималды құрамын әзірлеу міндеті өзекті болып қалуда.

Қойылған мәселе негізінде, осы зерттеуде табиғи цеолиттер мен суперпластификаторды белгілі бір концентрацияда өздігінен нығыздалатын бетондарына қосу арқылы бастапқы беріктік пен қоспаның реологиялық қасиеттері арасындағы оңтайлы теңгерімге жетуге болатыны туралы гипотеза зерттеледі.

Бұл зерттеудің мақсаты – табиғи цеолиттер мен тас ұнтағының өздігінен нығыздалатын бетондардың реологиялық және беріктік сипаттамаларына әсерін зерттеу. Зерттеу цеолит пен тас ұнтағын енгізудің оңтайлы пропорцияларын бағалауға бағытталған, бұл қоспаның беріктік сипаттамаларын нашарлатпай, қажетті ағындылықты қамтамасыз етеді. Жүргізілген эксперименттерге сәйкес, цеолитті 7 %-ға дейін енгізу бетонның беріктігін 80 %-ға арттырып, 7 күн қатайғаннан кейін 71 МПа дейінгі көрсеткіштерге жетуге мүмкіндік береді. Осы кезде төгілу қабілеті 710 мм және V-тәрізді воронка арқылы өту уақыты 12,5 секундты құрайды, бұл өздігінен нығыздалатын бетондарға қойылатын талаптарға сәйкес келеді.

Осылайша, зерттеу жергілікті минералды ресурстарды пайдалану есебінен жақсартылған эксплуатациялық сипаттамалары бар өздігінен нығыздалатын бетон құрамдарын әзірлеуге бағытталған. Бұл зерттеуде цеолиттердің, өздерінің пористық құрылымы мен пуццоландық қасиеттері арқасында, бетон қоспасының ағып кету қасиеттерін нашарлатпай, тез қатайуына ықпал ететіні болжанады. Бұл оларды құрылыс саласында ерте жүктемелер кезінде қолдануға перспективалы етеді.

Материалдар және зерттеу әдістері. М500 маркалы өздігінен нығыздалатын жылдам қатаятын бетонның негізгі құрамын анықтау үшін цемент шығынын барынша азайтуға және әртүрлі толтырғыштар мен функционалдық қоспаларды қолдануға бағытталған есептеу және эксперименттік әдіс қолданылды. Есептеулер Х. Окамура әдістемесі бойынша өздігінен нығыздалатын бетон қоспасының құрамын таңдау әдісі негізінде жүргізілді (Rings К.-Н., 2002). Негізгі байланыстырғыш зат ретінде «Бұқтырма цемент компаниясы» ЖШС-нің (В30-35 бетоны үшін) ПЦ 500 Д0 қолданылды. ПЦ 500-Д0 маркалы портландцементтің негізгі физикалық-механикалық қасиеттері, «Бұқтырма цемент компаниясы» ЖШС-нің жеткізушілерінің техникалық паспорттарында көрсетілгендей, өзгеріссіз төменде 1-кестеде көрсетілген.

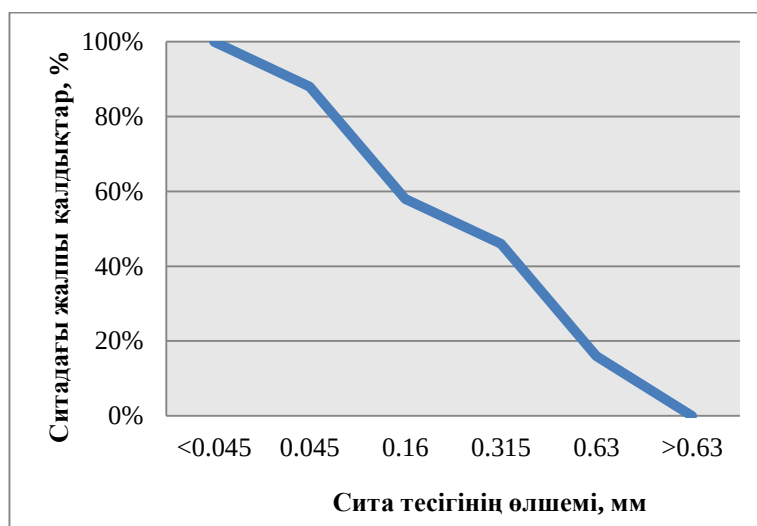
1-кесте. ПЦ 500-Д0 маркалы портландцементтің негізгі физикалық-механикалық қасиеттері, «Бұқтырма цемент компаниясы» ЖШС

Көрсеткіштің атауы, өлшем бірліктері	Мағынасы	
	ГОСТ 10178-85 талаптары	Іс жүзінде
Ұнтақтау дәрежесі № 008 ситадағы қалдық бойынша, %	15 артық емес	7,8
Тығыздық, г/см ³	Нормаланбайды	3,08
Көлемдік тығыздық, кг/м ³	Нормаланбайды	1021
Қалыпты қалыңдық, %	Нормаланбайды	26,5
Қатаю уақыты, сағ-мин		
Бастау	45 минуттан ерте емес	2-50
Аяқтау	10 сағаттан кеш емес	3-30
Көлемнің өзгеруінің бірқалыптылығы	Төзімді болуы керек	Төзеді
28 күннен кейінгі беріктік шегі, МПа		
қысу кезінде	49,0-ден кем емес	49,8
иілу кезінде	5,9-дан кем емес	6,5
<i>Ескерту – «Бұқтырма цемент компаниясы» ЖШС-нің негізінде құрастырылған</i>		

Минералды толтырғыш ретінде Алматы қаласына жақын орналасқан Чанканай кен орнынан алынған табиғи цеолит қолданылды. Қолданар алдында цеолит қажетті фракцияға дейін ұнтақталды (Golokhvast K.S., 2010). Төменде 1-суретте цеолиттің фракциялық құрамы диаграммасы берілген. Төмендегі 2-кестеде Чанканай кен орнынан алынған цеолиттің сипаттамасы көрсетілген. Табиғи цеолиттің толтырғышының фракциялық құрамы мен сипаттамасы (Оразымбетова А., 2024) мақаласынан алынған.

2-кесте. Чанканай кен орнынан алынған цеолиттің сипаттамасы

Көлемдік тығыздық, г/см						2,2	
Нағыз кеуектілік, %						12,60	
Моос шкаласы бойынша қаттылық						4	
Минералогиялық құрамы, %							
Клиптилолит		Плагиоклаз		Кварц	Магнетит	Анатаз	
60		27		6	6	1	
Химиялық құрамы, %							
SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	қыздыру кезінде жоғалтулар
57,86	5,06	2,32	5,48	2,38	15,03	1,67	8,86
Ескерту – (Оразымбетова А., 2024) негізінде құрастырылған							



1-сурет. Табиғи цеолиттен алынған толтырғыштың фракциялық құрамы

Ескерту – автормен құрастырылған

Басқа минералды толтырғыш ретінде Балтабай-1 кен орнынан алынған тау жыныстарының қиыршықтарын ұнтақтау арқылы алынған ұнтақтар қолданылды. Ұнтақтаудан кейін оның меншікті беті ПСХ-9 құралы арқылы анықталды. Тастар ұнтағы дайындалу үшін келесі тау жыныстары қолданылды: карьердегі басым тау жыныстары эффузивті тау жыныстары мен жарылған интрузивті тау жыныстары болып табылады. Эффузивті жыныстар гидротермальды-метасоматикалық өзгерістерге ұшыраған орта негізді порфириттер мен кварц-полевошпаттық құрамды кристалданған порфирлермен

ұсынылған; интрузивті жыныстар граниттер мен кварцті диориттің аралас жыныстары болып табылады (Купескі Р., 2018). Толтырғыш – 5-10 фракциялы ұсақ тас пен 2,5-5 фракциялы құм да Балтабай-1 карьері қиыршығының өндіріс қалдықтарынан алынған.

(Kolesnikova I.V., 2021) мақаласында СП мен ГП-ның әртүрлі түрлері мен дозаларының су азайтатын әсерін және олардың бетон қоспасының еруі мен өміршеңдігіне әсерін анықтау үшін тәжірибелер жүргізілді. Бетон қоспасын қатайту процесін жылдамдату үшін Master Glenium 977 суперпластикаторы қолданылды.

Өздігінен тығыздалатын бетон қоспасы НИКЦИМ – Точмашприбор АЛС-5 автоматты араластырғышының көмегімен дайындалды, ол араластырғыш цементті үлгі-балочкаларды ГОСТ 30744 талаптарына сәйкес дайындауға арналған.

Реологиялық қасиеттерін анықтау үшін бетон қоспасы екі әдіспен зерттелді: Хегерманн конусы арқылы қоспаның ағып кетуін өлшеу және қоспаның V пішінді воронка арқылы ағып шығу уақытын анықтау. Циолиттің өздігінен тығыздалатын бетонның реологиялық қасиеттеріне әсерін микрокремнеземмен салыстырғанда бағалау үшін минералды қоспалар цемент массасының 3...20 % мөлшерінде енгізілді. Бетон қоспасының ағып кетуі тұрақты су-цемент қатынасында (С/Ц) Хегерманн конусы және V пішінді воронка арқылы ағып шығу уақытын өлшеу арқылы анықталды (Bolotskikh O.N., 2009).

Бетонның беріктігін бақылау және бағалау ережелері (ГОСТ 18105-2018) құжатында белгіленген. Өздігінен нығыздалатын бетонның беріктігі қысу кезінде 7 күннен кейін 40×40×160 мм өлшеміндегі балочкаларда «Technotest» маркалы KD 300/R пресінде 3000 кН жүктемелі күшпен анықталды («Technotest S.R.L. Materials Testing Equipment» компаниясының техникалық құжаттамасы). 2-суретте «Technotest» маркалы KD 300/R пресінде өздігінен нығыздалатын бетонның беріктігін анықтау көрсетілген.



2-сурет. «Technotest» KD 300/R пресінде өздігінен нығыздалатын бетонның қысу беріктігін анықтау

Ескерту – автормен құрастырылған

Нәтижелері және оларды талқылау. Қиыршық тасты ұсақтау кезінде алынған тас ұнтағын минералды толтырғыш ретінде бетон қоспаларында қолдану оның реологиялық белсенділігі қажетті жайылу сипаттамаларына қол жеткізуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Алайда, бұл жағдайда қоспаның біртектілігі төмендейді, су бөлінуі байқалады, сондай-ақ бетон қоспасының тұтқырлық көрсеткіштері талаптарға сәйкес келмейді. Төменде 3-суретте қиыршық тасты ұсақтау өнімдерінен алынған тас ұнтағы қосылған бетон қоспасындағы су бөлінуі көрсетілген.



3-сурет. Қиыршық тасты ұсақтау өнімдерінен алынған тас ұнтағы қосылған бетон қоспасындағы су бөлінуі

Ескерту – автормен құрастырылған

Цеолитті қосу бетон қоспасының тұтқырлығын оңтайлы деңгейге дейін жоғарылатып, су бөлінуінің алдын алды және оның жоғары беріктік қасиеттерін қамтамасыз етті. Осылайша, 15 % тас ұнтағы мен 7 % цеолит қолданылған жағдайда, бетон қалыпты жағдайда 7 тәулік қатайғаннан кейін 70 МПа беріктік көрсеткіштеріне қол жеткізді. Төменде цеолит пен тас ұнтағының үйлесімді әсерінің нәтижесі 3-кесте түрінде көрсетілген.

3-кесте. Цеолит пен тас ұнтағының цемент массасының 15 %-ы мөлшерінде өздігінен нығыздалатын бетонның реологиялық және беріктік қасиеттеріне әсері

№	Цемент, кг	Цеолит, % цемент массасын ан	Қ:Щ	С/Ц	Жайылу, см	Су бөлінуі	V-тәрізді воронкадан ағу уақыты, сек	7 тәуліктегі беріктік, МПа
1	600	0	1:0,8	0,3	52	жоқ	9	60
2	492	3			66	жоқ	11,5	67
3	480	5			68	жоқ	12	69
4	468	7			71	жоқ	12,5	71
5	450	10			жоқ	нет	13	67

Ескерту – автормен құрастырылған

Толтырғыш қосылған ерітіндінің жайылуын өлшеу нәтижелері цеолиттің қоспаның қозғалғыштығын жақсартатынын көрсетті. Осылайша, 3 % цеолит қосылған кезде ерітіндінің жайылуы 27 см болды, бұл микрокремнезем үшін алынған 27 см нәтижеге ұқсас. Цеолиттің мөлшері 9 %-ға дейін артқан кезде ерітіндінің жайылуы 29 см-ге дейін ұлғаятыны байқалады, бұл осы минералдың жоғары реологиялық белсенділігін дәлелдейді. Салыстыру үшін, микрокремнеземнің мөлшері 9 %-ға дейін артқан кезде қоспаның қозғалғыштығы 22,5 см-ге дейін төмендеді. Бұл деректер (Fan T.V., 2013) зерттеуінің нәтижелерімен сәйкес келеді, онда ұқсас қоспалар аз мөлшерде енгізілген кезде ағымдылықтың жақсарғанын көрсетті. Төмендегі 4-суретте бетон қоспасына жүргізілген Хегерман конусы сынағының нәтижелері көрсетілген.



4-сурет. Хегерман конусы сынағының нәтижесі

Ескерту – автормен құрастырылған

Алайда, жоғарырақ дозалар (15-20 %) енгізілген кезде қоспаның қозғалғыштығы айтарлықтай төмендейді және оның жайылмау қабілеті байқалады, бұл минералдардың артық мөлшері кезінде тұтқырлықтың жеткіліксіз тұрақтылығын көрсетеді. Бұл төмендеу су-цемент қатынасының (С/Ц) азаюымен байланысты болуы мүмкін, бұл цементтің гидратациясының нашарлауына және оның беріктік сипаттамаларының төмендеуіне әкеледі. Төмендегі 4-кестеде $C/C = 0,3$ болғандағы өздігінен нығыздалатын бетон қоспасының реологиялық қасиеттерінің нәтижелері көрсетілген.

4-кесте. Өздігінен нығыздалатын бетон қоспасының реологиялық қасиеттері ($C/C = 0,3$)

№	Енгізілген толтырғыштың мөлшері, цемент массасына шаққандағы %	Толтырғыш енгізілген кездегі ерітіндінің жайылуы, см		Толтырғыш енгізілген кездегі V-тәрізді воронка арқылы ағу уақыты, сек.	
		цеолит	микрокремнезем	цеолит	микрокремнезем
1	3	27	27	8	7
2	5	26,5	26	9	8
3	7	27	25,5	9,5	10
4	9	29	22,5	10	12

4-кестенің соңы

№	Енгізілген толтырғыштың мөлшері, цемент массасына шаққандағы %	Толтырғыш енгізілген кездегі ерітіндінің жайылуы, см		Толтырғыш енгізілген кездегі V-тәрізді воронка арқылы ағу уақыты, сек.	
		цеолит	микрокремнезем	цеолит	микрокремнезем
5	15	24	17	11	15
6	17	20	Жайылмайтын*	12	-
7	20	Жайылмайтын *	Жайылмайтын*	-	-

Ескерту – автормен құрастырылған

Микрокремнеземнің беріктікке оң әсері (Fan T.V., 2013) зерттеуінде атап өтілгендей, цеолит қосылған кезде бұл әсер қатудың бастапқы сатыларында күштірек байқалды. Атап айтқанда, 7 % цеолит қосылған кезде үлгілердің беріктігі 80 %-ға артты, ал микрокремнеземнің 15 %-ға дейін қосылуындағы ең жоғары өсім небәрі 15-20 % болды. Төмендегі 5-суретте үлгілердің қысуға беріктігін сынау нәтижелері көрсетілген.



5-сурет. Тұрақты $C/C = 0,3$ кезіндегі өздігінен нығыздалатын бетонның беріктік қасиеттерінің нәтижелері

Ескерту – автормен құрастырылған

7 % цеолит қосылған өздігінен нығыздалатын бетонның (ӨНБ) беріктік қасиеттеріне цеолиттің әсерін зерттеу нәтижелері көрсеткендей, қысуға беріктіктің ең жоғары өсуі 7 тәулік қалыпты қатаю кезінде 80% құрады. Бұл нәтижелерді басқа авторлардың зерттеулерімен салыстыруға болады.

Мысалы, (Urban M., 2018) зерттеуінде цементтің бір бөлігін минералды компоненттермен алмастыру мүмкіндігі қарастырылып, мұндай қоспаларды қолдану беріктік сипаттамаларын жақсартуға ықпал ететіні, сондай-ақ экономикалық тиімділік пен экологиялық аспектілерге оң әсер ететіні көрсетілген. Алайда, минералды

толтырғыштарды, соның ішінде ұшпа күл мен кремнеземді қосудың оң әсеріне қарамастан, өздігінен нығыздалатын бетонда қысуға беріктік пен сорбциялық қабілеттің арасында корреляция байқалмайды. Бұл менің нәтижелеріммен сәйкес келеді, онда 7% цеолит қосылған кезде қысуға беріктіктің ең жоғары өсуі байқалғаны анықталды, бұл оның беріктік қасиеттеріне айтарлықтай әсер ететінін көрсетеді.

(Derepko S. N., 2015) зерттеуінде ұшпа күл мен кремний диоксидінің буын қамтитын өздігінен нығыздалатын бетонның сорбциялық қабілеті зерттелді. Нәтижелер ұшпа күл мен кремнеземді қосу бетонның су сіңіруін айтарлықтай төмендетіп, қысуға беріктігін арттыратынын көрсетті. Бұл сондай-ақ менің зерттеу нәтижелеріммен сәйкес келеді, онда 7 % цеолит қосылған кезде бетонның беріктігінің жақсаруы байқалды. Алайда, (Derepko S.N., 2015).зерттеуінде су сіңіруді төмендететін қоспалар қолданылғанымен, менің жағдайымда цеолиттің беріктік сипаттамаларына әсері айқынырақ байқалды.

Сонымен қатар, (Wang H.Y., 2013) зерттеуінде өздігінен нығыздалатын бетонның құрамына пеш шлағын қосу әсері қарастырылды. Шлактың беріктік қасиеттеріне әсері қысуға беріктіктің жоғарылауына әкелгенімен, менің зерттеуімдегідей, мұндай өзгерістер шөгу мен ағымдылық сияқты басқа сипаттамалардың өзгеруімен қатар жүрді. (Wang H.Y., 2013) зерттеуінен айырмашылығы, онда шлак қосылған кезде беріктіктің өзгерісі аз болған, менің зерттеуімде 7 % цеолит қосу айтарлықтай әсер беріп, беріктіктің 80 %-ға өсуіне әкелді.

Осылайша, менің зерттеуімнің нәтижелері цеолит сияқты минералдарды қосу өздігінен нығыздалатын бетонның беріктік қасиеттерін жақсартуда тиімді екенін дәлелдейді. Цеолит қосу кезінде алынған әсер ұшпа күл немесе пеш шлағы сияқты басқа минералдармен жүргізілген ұқсас зерттеулердің нәтижелерінен асып түседі, бұл цеолитті өздігінен нығыздалатын бетон құрамында қолданудың перспективалы екенін көрсетеді.

Қорытынды. Жүргізілген зерттеу барысында табиғи цеолиттер мен тас ұнының өздігінен нығыздалатын бетондардың (ӨНБ) реологиялық және беріктік қасиеттеріне әсері зерттелді. Эксперимент нәтижелері цеолитті 7 %-ға дейін қосу бетонның беріктігін айтарлықтай арттырып, оны 80 %-ға ұлғайтуға мүмкіндік беретінін және 7 тәулік қатаюдан кейін 71 МПа-ға дейін жететінін көрсетті. Сондай-ақ, қоспаның жайылу көрсеткіші талапқа сай 710 мм деңгейінде қамтамасыз етілді, ал V-тәрізді воронкадан өту уақыты 12,5 секундты құрады, бұл өздігінен нығыздалатын бетондарға қойылатын стандарттарға сәйкес келеді.

Зерттеу нәтижесінде табиғи цеолиттерді өздігінен нығыздалатын бетонның беріктік қасиеттерін жақсарту үшін олардың реологиялық қасиеттерін нашарлатпай қолдануға болатыны расталды. Бетонның жоғары беріктігі мен қозғалғыштығын қамтамасыз ететін қоспаның оңтайлы құрамы анықталды. Алынған деректер табиғи минералдар қоспасы қосылған жоғары тиімді бетондарының әрі қарай дамуына негіз бола алады.

Әдебиеттер тізімі

- Өздігінен тығыздалатын бетон бойынша еуропалық нормативтік құжат: DAFSTB-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie). 2003 жылғы қараша айындағы басылым.
- Zhiwei Qian, Guang Ye, Erik Schlangen және Klaas van Breugel. (2017). Цементтің минералдық құрамының цемент пастасының механикалық қасиеттеріне әсері. Делфт технологиялық университеті, Нидерланды. (Ағылшын тілінде).
- Bolotskih O.N. (2008). Өздігінен тығыздалатын бетон және оның диагностикасы. Бетон технологиясы, № 10, 28-31 б. (Орыс тілінде).
- Vovk A.I. (2012). Отындық поликарбоксилаттар негізіндегі қоспалар. XXI ғасырдың құрылыс материалдары, жабдықтары, технологиялары, № 9, 31-33 б. (Орыс тілінде).

- Barabanshchikov Yu.G., Komarinskiy M.V. (2014). Суперпластификатор S-3-тің бетон қоспаларының технологиялық қасиеттеріне әсері. *Advanced Materials Research*, Vols. 941-944, 780-785 б. Trans Tech Publications, Швейцария. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.780> (Ағылшын тілінде).
- Okamura H., Ouchi M. (2003). Өздігінен тығыздалатын бетон. *Advanced Concrete Technology*, № 1, 5-15 б. (Ағылшын тілінде).
- Urban M. (2018). Цемент құрамы төмен SCC (Эко-SCC) – дәстүрлі дайын бетонға балама. *MATEC Web of Conferences* (Vol. 163, p. 01004). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816301004> (Ағылшын тілінде).
- Derepko S. N., Nikiforova I. A. (2015). Көмір өнеркәсібінің күл және қож қалдықтарын енгізудің тиімділігін кешенді бағалау моделі. *Байкал зерттеу журналы*, 6, 7-17. (Орыс тілінде).
- Leung H.Y., Kim J., Nadeem A., Jaganathan J., Anwar M. P. (2016). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.071> (Ағылшын тілінде).
- Wang H. Y., Lin C. C. (2013). Өздігінен тығыздалатын жоғары шлакты бетонның жаңа және инженерлік қасиеттерін зерттеу. *Construction and Building Materials*, 42, 132-136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.020> (Ағылшын тілінде).
- Fan T.V. (2013). Күріш қауызының күлі мен метакаолині бар өздігінен тығыздалатын жоғары беріктікті бетон. Ростов мемлекеттік құрылыс университеті. (Қорғалмаған кандидаттық диссертация) (Орыс тілінде).
- Rings K.-H., Kolczyk H., Losch P. (2002). SCC: Бетон құрамының шектеулері. *Beton*, 4, 192-196 б. (Ағылшын тілінде).
- Golokhvast K. S., Panichev A. M., Chekryzhov I. Yu., Kusaykin M. I. (2010). Биологиялық белсенді қоспаларды өндіру үшін табиғи цеолитті ұнтақтау тізімі. *Химико-фармцевтикалық журнал*, № 2, 37-40 б. <https://doi.org/10.30906/0023-1134-2010-44-2-37-40> (Орыс тілінде).
- Оразымбетова А., Сакибаева С., Сагитова Г., Сүйгенбаева А. (2024). Шанқанай кен орнындағы цеолиттердің физика-химиялық қасиеттерін зерттеу. *ҚР ҰҒА Хабарлары. Химия және технология сериясы*, (2), 138–150. <https://doi.org/10.32014/2024.2518-1491.228> (Қазақ тілінде).
- Kunecki P., Panek R., Kotejac A., Franus W. (2018). Көмір ұшағы микросфераларынан алынған Na-P1 цеолитінің кристалдық құрылымына реакция уақытының әсері. *Microporous and Mesoporous Materials*, 266, 102-108 б. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2018.05.007> (Ағылшын тілінде).
- Kolesnikova I.V., Alguzhina D.R. (2021). Өндірістік технологиялар үшін жедел қатайтатын кальцинделмеген өздігінен тығыздалатын бетондарды әзірлеу. № 2 (80), 28-34 б. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2021.2-28> (Орыс тілінде).
- Bolotskikh O.N. (2009). Өздігінен тығыздалатын бетон және оның диагностикасы. Харьков ұлттық қалалық шаруашылық академиясы. <https://pamag.ru/prensa/auto-beton> (Орыс тілінде).
- ГОСТ 18105-2018 – "Бетондар. Бақылау және беріктікті бағалау ережелері."
- "Technotest S.R.L. Materials Testing Equipment" компаниясының техникалық құжаттамасы, Италия, ГОСТ R 8.663-2009 GSI. Күш өлшеуіш құралдарын мемлекеттік тексеру схемасы.

Information about authors

Galymzhanova Dinara – master of engineering and technology, Zhangir Khan West Kazakhstan Khan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan, diko_96@bk.ru

Tilekkabyl Alua – master of engineering and technology, IEC Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, Almaty, Kazakhstan, Kanbabina@mail.ru

Yeskaliyev Meirambek – master of engineering and technology., Zhangir Khan West Kazakhstan Khan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan, eskaliev-1991@mail.ru

Saktaganova Nargul – PhD, Department of «Architecture and Construction Production», Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, amanovna.75@mail.ru

Zhapakhova Akmaral – Candidate of Technical Sciences, associate professor, Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan, zhapakhova@mail.ru

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_212
MFTAA 67.29.03

С.К. Есенгабулов¹, М.С. Кожамет², Е.Б. Жаркенов³, Е.Н. Абаканов⁴, М. Жанкелді⁵

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

¹E-mail: serik-y@mail.ru*

²E-mail: meiram_kms@mail.ru

³E-mail: berdenovich@gmail.com

⁴E-mail: eldos_abakanov@mail.ru

⁵E-mail: meirzhankeldi@gmail.com

ЖАРЫҚӨТКІЗГІШ ҚҰРЫЛЫМДАРДЫҢ ЖЫЛУ СИПАТТАМАЛАРЫН БАҒАЛАУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

EVALUATION AND ANALYSIS OF THERMAL CHARACTERISTICS OF TRANSPARENT STRUCTURES

Аңдатпа. Бұл мақалада Қазақстандағы тұрғын үй секторындағы ғимараттардың энергия тиімділігін арттыру мәселелері жан-жақты қарастырылады. Қазіргі таңда республика бойынша қолданыстағы ғимараттардың басым көпшілігі, әсіресе өткен ғасырдың ортасында салынған тұрғын үйлер, жоғары жылу шығындары және төмен энергия тиімділік кластарымен сипатталады. Мұндай жағдай жыл сайынғы коммуналдық шығындардың артуына және жылу энергиясының айтарлықтай ысырап болуына алып келеді. Осыған орай, ғимараттардың сыртқы қоршау элементтерінің, оның ішінде жарық өткізгіш құрылымдардың, әсіресе терезелердің, жылу техникалық сипаттамаларын жақсарту – өзекті міндетке айналып отыр.

Мақалада 1968 жылы салынған типтік бес қабатты тұрғын үй мысалында жарық өткізгіш құрылымдардың әртүрлі нұсқаларының техникалық-экономикалық тиімділігі бағаланған. Зерттеу барысында ғимараттың жылу тұтыну көрсеткіштері, инфильтрациялық ауа алмасу, күн радиациясынан түсетін жылу көлемі және тұрмыстық жылу көздері ескеріліп, нақты инженерлік есептеулер жүргізілген. Заманауи энергия тиімді терезелерді қолдану арқылы ғимараттағы жылу энергиясының шығынын екі есеге дейін азайтуға болатындығы анықталды. Ескі терезелердің орнына жаңа, көп камералы профильдер мен энергия үнемдейтін шыны пакеттерден жасалған терезелерді орнату нәтижесінде инвестициялардың өтелу мерзімі орта есеппен 5-11 жыл аралығында болады.

Сонымен қатар, жаңадан салынатын ғимараттарда нормативтік талаптардан да жоғары деңгейдегі терезелерді қолдану арқылы қосымша 12 %-ға дейін энергия үнемдеуге қол жеткізуге болады. Бұл жағдайда өтелу мерзімі небәрі 1-2,8 жылды құрайды.

Мақала нәтижелері Қазақстанда құрылыс саласында энергия тиімді материалдар мен шешімдерді кеңінен қолдану қажеттілігін дәлелдей отырып, мемлекеттік стандарттарды жаңартуға, қалалық инфрақұрылымды жаңғыртуға және қоршаған ортаға келетін әсерді азайтуға бағытталған нақты ғылыми негіз ұсынады.

Түйін сөздер: жарық өткізгіш құрылымдар, энергия тиімділігі, жылу бөлу, жылу шығыны, инвестициялардың өтелу мерзімі.

Аннотация. В статье всесторонне рассматриваются вопросы повышения энергоэффективности зданий в жилищном секторе Казахстана. В настоящее время большинство существующих зданий в стране, особенно построенные в середине прошлого века, характеризуются высокими теплопотерями и низким классом энергоэффективности. Это приводит к увеличению коммунальных расходов и значительным потерям тепловой энергии в отопительный сезон. В связи с этим актуальной задачей является улучшение теплотехнических характеристик наружных ограждающих конструкций, в частности светопрозрачных элементов – окон и дверей.

В качестве объекта исследования был выбран типовой пятиэтажный жилой дом, построенный в 1968 году в городе Астана. Выполнено сравнение четырех вариантов оконных конструкций: от устаревших до современных энергоэффективных. Проведены подробные инженерные расчеты, включающие анализ теплопотерь, инфильтрации воздуха, поступления солнечной радиации и внутренних тепловыделений. Установлено, что замена старых окон на современные энергосберегающие с многокамерными профилями и теплоизоляционными стеклопакетами позволяет снизить потребление тепловой энергии в 2 раза. Срок окупаемости таких инвестиций составляет от 5 до 11 лет.

Для вновь строящихся зданий внедрение усиленных энергосберегающих оконных систем обеспечивает дополнительную экономию энергии до 12 % при сроке окупаемости от 1 до 2,8 лет. Авторы подчеркивают, что для достижения высокого уровня энергоэффективности требуется комплексный подход: утепление стен, полов, крыш и внедрение автоматизированных систем управления отоплением.

Полученные результаты подтверждают необходимость обновления нормативных требований, популяризации современных строительных решений и развития устойчивой городской инфраструктуры в Казахстане. Исследование представляет научно обоснованный вклад в формирование энергоэффективной строительной политики. Ключевые слова: светопрозрачные конструкций, энергоэффективность, тепловыделение, теплопотери, срок окупаемости инвестиций.

Ключевые слова: светопрозрачные конструкций, энергоэффективность, тепловыделение, теплопотери, срок окупаемости инвестиций.

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of energy efficiency challenges in Kazakhstan's residential building sector. A significant number of existing buildings, particularly those constructed during the Soviet era, suffer from substantial heat loss and exhibit low energy efficiency classifications. This results in increased heating costs and energy waste, especially during the cold season. As such, improving the thermal performance of building envelope components – especially translucent structures such as windows – has become an urgent priority.

The study focuses on a typical five-story apartment building constructed in 1968 in Astana. Four window structure scenarios were analyzed, ranging from outdated wooden frames to modern energy-efficient designs. Detailed engineering calculations were performed, taking into account thermal losses, air infiltration, solar heat gain, and internal heat emissions. Findings show that replacing old windows with modern, multi-chamber PVC profiles and insulated glazing units can reduce heating energy consumption by up to 50%. The estimated investment payback period for such upgrades ranges from 5 to 11 years.

For newly constructed buildings, the integration of high-performance energy-efficient windows provides an additional 12% reduction in heating demand, with a payback period between 1 and 2.8 years. The authors also emphasize the importance of a comprehensive approach to improving energy performance, including insulation of floors, walls, and roofs, along with automated heating control systems.

The results provide strong technical and economic justification for updating Kazakhstan's building codes and promoting the widespread adoption of energy-efficient materials and technologies. This research contributes a well-substantiated scientific basis for future sustainable development in the construction sector and supports national efforts to enhance environmental responsibility and reduce energy dependency.

Keywords: translucent structures, energy efficiency, heat dissipation, heat loss, the payback period of investments.

Kipicne. Энергия тиімді ғимарат – бұл жайлы микроклиматты қамтамасыз ету үшін энергия шығынын барынша азайту мақсатында архитектуралық, конструктивтік және инженерлік шешімдерді қамтитын ғимарат. Энергия тиімді ғимараттардың міндеті тек энергияны үнемдеумен шектелмей, адам өміріне қолайлы жағдай жасау және ғимарат ішіндегі денсаулыққа қолайлы микроклиматты сақтау болып табылады (Қазақстан Республикасының 2012 жылғы 13 қаңтардағы №541-IV Заңы; МЕМСТ 30494-201; Есенгабулов, 2009; Есенгабулов, Дәстенова, 2024). Сыртқы климаттың ғимараттың жылулық теңгеріміне әсерін оңтайландыру үшін ғимараттың пішінін, көлемдік-жоспарлау және конструктивтік шешімдерін, күнге бағытталуын дұрыс таңдау, ішкі жылу бөлуі мен күн радиациясынан жылу түсуін пайдалану, жылыту жүйесін автоматты түрде реттеу ғана емес, сондай-ақ ғимараттарды шынылау кезінде сыртқы жарық өткізгіш

құрылымдарды, атап айтқанда: терезелерді, балкон есіктерін, витриналар, витраждар мен шамдарды (бұдан әрі – терезелер) тиімді тандап, оларды ұтымды орналастыру өте маңызды (Есенгабулов, Қожахмет, Сабитов, 2024; Есенгабулов, Жаркенов, Қожахмет, Нұрбаева, Джексембаева, 2024).

Қазақстандағы көпшілік ғимараттардың энергия тиімділік деңгейі төмен (ҚРҰҚ 2013 жыл 29 тамыз №904; ҚРҰҚ 2014 жыл 28 маусымдағы № 728). Қазіргі таңда Қазақстандағы тұрғын үй секторы жылу энергиясының 40 % астамын тұтынады. Сарапшылардың бағалауы бойынша, ғимараттардың шамамен 70 %-дың жылу техникалық сипаттамалары қазіргі талаптарға сай келмейді. Орташа алғанда, зерттелген үйлердің жылу энергиясын тұтыну көрсеткіші жылына 1 м² үшін 270 кВт·сағ құрайды. Осыған байланысты, Қазақстанда ғимараттарды күрделі жөндеуден өткізу кезінде жылу энергиясын тұтынуды кемінде 30 %-ға төмендету қажет (Белый, 2015).

Қазіргі уақытта Қазақстанда ескі тұрғын үй қорын күрделі жөндеуден өткізумен қатар, тұрғын үйлер мен әлеуметтік нысандардың (мектептер, ауруханалар, емханалар) типтік жобалары әзірленуде. Бұл бастама құрылыс құнының негізсіз өсуіне жол бермеуге және барлық өңірлерде стандартталған жобаларды пайдалану арқылы бюджеттік қаражатты тиімді жұмсауға бағытталған. Бұл Қазақстанда энергия тиімді құрылыс құрылымдарын өнеркәсіптік ауқымда енгізуге, оның ішінде жарық өткізгіш құрылымдарды зауыт жағдайында 100 % дайын күйінде өндіруге мүмкіндік бар екенін көрсетеді. Бұл ретте энергия тиімді терезелерді таңдаудағы басты талаптардың бірі – терезе жақтауларын ені 70 мм-ден асатын 5 камералы және одан көп заманауи металлпластикалық профильдер мен энергия үнемдейтін шынылардан жасалған екі немесе үш қабатты шыныпакеттер болуы тиіс (Есенгабулов, 2015).

Қазіргі таңда еліміздің құрылыс саласында еденнен төбеге дейін немесе қабырғаның үлкен немесе барлық аумағына қойылып жатқан «Панорамалық терезелер» немесе «Француз терезелері» деп аталатын терезе блоктарын кеңінен қолданыла бастады. Осы сияқты және басқа да қазіргі уақытта қолданыста бар жарық өткізгіш құрылымдар арқылы айтарлықтай жылу жоғалатындықтан олар жылуокшауланған қабырғаларды алмастыра алмайтынын, сәйкесінше, ғимараттардың энергия тиімділік класы айтарлықтай төмендейтінін, сонымен қатар ғимараттарды пайдалану кезінде тұрғындардың үйді жылытуға кететін коммуналдық төлемдердің артатынын ескере кету керек. Жарық өткізгіш құрылымдар арқылы тұрғын үй ғимараттарын жылыту кезеңінде жылу энергиясының едәуір бөлігі жоғалатынын ескере отырып, жаңа ғимараттарды салу, терможаңғырту және қолданыстағы ғимараттарды қайта жаңарту кезінде осы құрылымдардың жылу беруіне келтірілген кедергілер мәнін жоғарылату үшін жаңа талаптарды белгілеу қажет.

Осыған байланысты, Қазақстанда терезелердің энергия тиімділігіне қойылатын талаптарды күшейтудің артықшылықтары мен кемшіліктерін, сондай-ақ оның техникалық және экономикалық салдарын (жобаның қымбаттауы және т.б.) шартты тұрғын үйлердің жобалары негізінде талдау өзекті мәселе болып табылады.

Зерттеу әдістемесі. Ғимараттардың энергия тиімділігін және терезелерге қойылатын жоғары талаптарды енгізудің экономикалық әсерін бағалау үшін жұмыс жасалған 2015 жылы қолданыста болған нормативтік құжаттарға қолданылды (ҚР ҚН 2.04-21-2004; МҚЕ 24-01-2011). Жылыту мен желдетуге жұмсалатын меншікті жылу тұтыну көрсеткіші бойынша ғимараттардың энергия тиімділігін бағалау және талдау мына әдістемелер бойынша анықталды (АВОК, 2011; Есенгабулов, Қожахмет, Сабитов, 2024; Белый, 2015).

Ғимараттардың энергия тиімділігі жылыту мен желдетуге жұмсалатын меншікті жылу тұтыну көрсеткіші бойынша бағаланды. Бұл көрсеткіш әртүрлі ғимараттарды өзара және нормативтік талаптармен салыстыруға мүмкіндік береді.

Сыртқы қоршау құрылымдарының жылу өткізгіштікке қарсылығына қойылатын талаптар құрылыс жүргізілетін аймақтың қысқы кезеңдегі градус-тәуліктерінің санына (D_d , °C·тәулік) байланысты белгіленеді. Қысқы кезеңдегі градус-тәуліктер саны келесі формула бойынша есептелді:

$$D_d = (t_{int} - t_{ht})z_{ht} \quad (1)$$

мұнда: t_{int} – ғимараттың жылыту кезеңіндегі орташа ішкі температура, °C; t_{ht} – жылыту кезеңіндегі орташа сыртқы температура, °C; z_{ht} – жылыту кезеңінің ұзақтығы, тәулік.

Сыртқы қоршау құрылымдары арқылы жылу шығындары мына формуламен анықталды:

$$Q_{tr}^y = 0,024D \sum_i \frac{1}{R_i} A_i n \quad (2)$$

мұнда: R_i – сыртқы қоршау құрылымдарының жылу өткізгіштікке қарсылығы, м²·°C/Вт; A_i – сыртқы қоршау құрылымдарының ауданы, м²; n – сыртқы ауаға қатысты қоршау құрылымдарының орналасуын ескеретін түзету коэффициенті.

Ескі ағаш терезелердің ауа өткізгіштікке қарсылығы мына формуламен анықталды:

$$R_{a.F} = 0,57 \cdot (1/10)^{2/3}, \text{ м}^2 \cdot \text{сағ/кг}$$

Минималды қажетті инфильтрация мөлшері (кг/сағ) мына формула бойынша есептелді:

$$G_{inf}^{мин} = 3,6A_{r\text{ ср}} + G_{закр.кв} \beta_{Fi} \left(\frac{A_{F.кyx}}{A_{F.кв}} \right) \quad (3)$$

мұнда: $A_{r\text{ ср}}$ – ғимараттағы бір пәтердің орташа тұрғын алаңы, м²; $G_{закр.кв}$ – жабық терезелер кезіндегі инфильтрация мөлшері, кг/ч; β_{Fi} – ғимараттың нақты сипаттамаларына байланысты коэффициент. $A_{F.кв}$ – ғимарат бойынша бір пәтердегі терезелер мен балкон есіктерінің орташа ауданы, м²; $A_{F.кyx}$ – ғимарат бойынша бір ас үйдегі терезелердің орташа ауданы, м².

Пәтердегі орташа инфильтрация көлемі келесі формуламен есептелді:

$$G_{inf\text{ кв}} = G_{закр\text{ кв}} \beta_{Fi} \beta_N \quad (4)$$

мұнда: β_N – терезе элементтерін ашу арқылы инфильтрацияны желдету нормасына дейін арттыру коэффициенті.

Тұрғын үйдегі инфильтрацияланған ауаның шығыны келесі формуламен анықталды:

$$G_{inf} = G_{inf.кв} K_{кв} + (0,57 - 0,00172t_{ext}^m) G_{inf.ллу} N \quad (5)$$

мұнда: $K_{кв}$ – ғимараттағы пәтерлер саны; $G_{inf.ллу}$ – баспалдақ және лифт холлындағы инфильтрация көлемі, кг/ч; N – ғимараттың қабат саны. $G_{inf.кв}$ – ғимарат бойынша бір пәтердің терезелері арқылы инфильтрацияның орташа мөлшері.

Қосымша инфильтрация коэффициенті келесі формуламен анықталды:

$$k_v = \frac{G_{inf}}{3,6A_{r\text{ ср}} K_{кв}} = \frac{G_{inf}}{3,6A_r} \quad (6)$$

Ғимараттың жылу шығынын желдету аумағы алмасуынан инфильтрацияны ескере отырып, жылыту кезеңінде (кВт·сағ) келесі формула бойынша анықтайды:

Жылыту кезеңіндегі желдету мен инфильтрация есебінен жылу шығыны келесі формуламен есептелді:

$$Q_{inf}^y = 6,7 \cdot 10^{-3} (L_v K_v + L_{v.o}) c_v P_a^{ht} D_d \quad (7)$$

мұнда: L_v – ғимараттағы пәтерлердегі ауа алмасу, м³/ч; K_v – қосымша инфильтрация коэффициенті; c_v – ауаның меншікті жылу сыйымдылығы, кДж/(кг·°C); P – жылыту маусымындағы инфильтрацияланған ауаның орташа тығыздығы, кг/м³.

Тұрмыстық жылу шығарындылары келесі формуламен есептелді:

$$Q_{inf}^y = 0,024 q_{inf} Z_{inf} A_r \quad (8)$$

мұнда: q_{inf} – тұрмыстық жылу шығарындыларының меншікті мөлшері, Вт/м²; A_r – тұрғын бөлмелердің ауданы, м².

Күн радиациясынан терезелер арқылы жылу түсімі келесі формула бойынша анықталды:

$$Q_5^y = \tau_F k_F \sum_{k=1}^8 A_{F.kB} I_k \quad (9)$$

мұнда: τ_F – терезе әйнегі арқылы күн радиациясының өту коэффициенті; k_F – көлеңкелеу коэффициенті; $A_{F.kB}$ – терезелердің жалпы ауданы, м²; I_k – жылу беру кезеңіндегі терезеге түсетін орташа күн радиациясы, кВт·ч/м².

Жылыту кезеңінде ғимараттың жылыту мен желдетуге жұмсалатын жылу энергиясы келесі формуламен анықталды:

$$Q_h^y = [Q_{tr}^y + Q_{inf}^y - (Q_{int}^y + Q_5^y) \nu \zeta] \beta_h \quad (10)$$

мұнда: Q_{tr}^y – ғимараттың сыртқы қоршау құрылымдары арқылы жылу шығыны, жылыту кезеңінде (кВт·сағ); Q_{inf}^y – ғимараттың жылу шығыны желдету аумағы алмасуынан инфильтрацияны ескере отырып, жылыту кезеңінде (кВт·сағ); Q_{int}^y – пәтерлер мен қоғамдық мақсаттағы орындардағы тұрмыстық жылу түсімдері, жылыту кезеңінде (кВт·сағ); Q_5^y – күн радиациясынан сыртқы жарық өткізетін қоршау құрылымдары арқылы келетін жылу түсімдері, қасбеттердің бағдарын ескере отырып, жылыту кезеңінде (кВт·сағ); ν – жылу түсімдерінің бөлме жылу шығындарынан артып кету кезеңдерінде пайдалануын төмендету коэффициенті; η – жылыту жүйесіне жылу беру мөлшерін автоматты реттеу жүйелерінің тиімділік коэффициенті; β_h – жылыту жүйесінің қосымша жылу тұтынуын ескеретін коэффициент.

Меншікті жылу энергиясын тұтыну келесі формуламен есептелді:

$$q_h^y = \frac{Q_h^y}{A_h} \quad (11)$$

мұнда $A_h^{мин}$ – ғимараттың жалпы пайдалы ауданы, м².

Терезелердің энергия тиімділігінің жоғары талаптарын енгізудің экономикалық әсері келесі факторлар есебінен энергия тұтынудың төмендеуіне қол жеткізіледі: Терезе блоктарының жылу қарсылығын арттыру және жылу шығынын азайту; Ауа өткізгіштік коэффициентін арттыру, нәтижесінде терезе саңылауларынан инфильтрация арқылы кіретін сыртқы ауаны жылытуға жұмсалатын энергия азаяды; Қызмет ету мерзімінің ұлғаюы және пайдалану шығындарының болмауы.

Жылу энергиясы мен отынды үнемдеуді есептеу төменде келтірілген әдістеме бойынша жүргізіледі.

Терезелер арқылы жылу шығындарын өтеуге жұмсалатын жылу энергиясын анықтау, Гкал

$$Q = Q_{от} + Q_{и} \quad (12)$$

Жылу шығындарын өтеуге жұмсалатын негізгі жылдық жылу энергиясы, Гкал:

$$Q_{от} = F_o / R_T \cdot (t_{вн} - t_{н}) \cdot n \cdot T_{от} \cdot 10^{-6} \quad (13)$$

мұнда: F_o – терезе саңылауларының ауданы, м²; R_T – терезе саңылауларының қоршаушы құрылымдарының жылу өткізгіштікке қарсылығы, м²·°C/Вт; $t_{вн}$, $t_{н}$ – ішкі және сыртқы ауаның есептік температурасы, °C; n – терезе құрылымдарының сыртқы ауамен байланысын ескеретін коэффициент; $T_{от}$ – жылыту маусымының ұзақтығы, тәулік.

Инфильтрация арқылы келетін сыртқы ауаны жылытуға жұмсалатын қосымша жылдық жылу энергиясы, Гкал:

$$Q_{и} = 0,24 \cdot A \cdot G \cdot F_o \cdot (t_{вн} - t_{н}) \cdot T_{от} \cdot 10^{-6} \quad (14)$$

мұнда: A – қарсы жылу ағынының әсерін ескеретін коэффициент, терезелер мен балкон есіктері үшін: бөлек жақтаулары бар терезелерде $A=0,8$; жұптасқан жақтаулары бар терезелерде $A = 1,0$; F_o – терезе саңылауларының қоршау құрылымдарының ауданы, m^2 ; $t_{вн}$, t_n – ішкі және сыртқы ауаның есептік температуралары, $^{\circ}C$; $T_{от}$ – жылыту кезеңінің ұзақтығы, тәулік; G – тұрғын және қоғамдық ғимараттарға инфильтрация арқылы енетін ауаның мөлшері, $kg/(m^2 \cdot сағ)$

$$G = \Delta P / R_{и} \quad (15)$$

мұнда: $R_{и}$ – терезе блоктарының ауа өткізгіштікке қарсылығы, $m^2 \cdot сағ \cdot Па / кг$; ΔP – терезенің ішкі және сыртқы беттері арасындағы ауа қысымының айырмашылығы, $Па$.

Ауа қысымының айырмашылығы келесі формуламен анықталды:

$$\Delta P = 0,55 \cdot H \cdot (p_n - p_v) + 0,03 \cdot p_n \cdot V_{ср}^2 \quad (16)$$

мұнда: H – ғимараттың жер бетінен карниздің жоғарғы бөлігіне дейінгі биіктігі, $м$; $V_{ср}^2$ – қаңтардың румбалар бойынша ең жоғарғы орташа жел жылдамдығы, $м/с$; p_n , p_v – сыртқы және ішкі ауаның меншікті салмағы, $Н/м^3$.

Энергия тиімді терезе блоктарын енгізудің жылдық жылу үнемдеу мөлшері, $Гкал$:

$$\Delta Q = Q_{сущ} - Q_{зам} \quad (17)$$

мұнда: $Q_{сущ}$ – ауыстыруға жататын қолданыстағы терезе құрылымдарының жылдық жылу шығыны, $Гкал$; $Q_{зам}$ – жаңа, энергия тиімді терезе құрылымдарының жылдық жылу шығыны, $Гкал$.

Жылу энергиясын тұтынудың төмендеуінен отын үнемдеу шартты отын тоннасында (бұдан әрі – ш.о.т.) мына формула бойынша анықталды:

$$\Delta \mathcal{E}_t = \Delta Q \cdot (1 + k_{пот}/100) \cdot b_{тэ} \cdot 10^{-3} \quad (18)$$

мұнда: ΔQ – ғимараттың қоршаушы құрылымдары арқылы жылу шығынын азайту нәтижесінде үнемделген жылу энергиясы, $Гкал$; $b_{тэ}$ – жылу энергиясын өндіруге жұмсалатын меншікті отын шығыны ($200 \text{ кг ш.о.}/Гкал$); $k_{пот}^{тэ}$ – қолданыстағы жылу желілеріндегі жылу шығыны коэффициенті.

Инвестициялық шығындардың жалпы сомасын есептеу, мың теңге:

$$K = C_m + 0,1 \times C_{смп} + 0,5 \times C_m \quad (19)$$

мұнда: K – жалпы капиталдық салымдар, мың теңге; C_m – материалдардың құны, мың теңге; $C_{смп}$ – құрылыс-монтаж жұмыстарының құны (материал құнының 50%-ы; жобалау жұмыстарының құны құрылыс-монтаж жұмыстарының 10%-ы деп қабылданды).

Энергия тиімділігі шарасының өзін-өзі өтеу мерзімін есептеу, жыл:

$$T_{ок} = K / (\Delta \mathcal{E}_t \cdot C_{топл}) \quad (20)$$

мұнда: $\Delta \mathcal{E}_t$ – энергия тиімділігін арттыру арқылы үнемделген отын мөлшері, ш.о.т.; $C_{топл}$ – 1 ш.о.т. құны, мың теңге.

Бұл есептеулер терезе құрылымдарының энергия тиімділігін арттыру арқылы жылу энергиясын үнемдеудің нақты экономикалық әсерін анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттеу нысаны. Шартты ғимарат ретінде Астана қаласында 1968 жылы салынған типтік «Хрущев» ғимараты деп аталып кеткен 5-қабатты тұрғын үйдің көлемді-жоспарлау шешімі өзгеріссіз қабылданды. Есептеуге қажетті мәндер 2015 жылда қолданыста болған нормативтік құжаттарға сай қабылданды (ҚР ҚН 2.04-21-2004).

Климаттық деректер: Астана қаласының сыртқы ауаның есептік температурасы – $35^{\circ}C$; желдің орташа жылдамдығы – $5,9 \text{ м/с}$; сыртқы ауаның орташа температурасы – $8,1^{\circ}C$; жылыту кезеңінің ұзақтығы – 216 күн; ішкі ауаның орташа температурасы $+21^{\circ}C$.

Нысанның жалпы деректері және геометриялық параметрлері: ғимараттағы қабаттар саны – 5; ғимараттың бағдарлары – шығыс-батыс; ғимараттағы пәтерлер саны – 90; ғима-

раттың жылытылатын бөлігінің құрылыс көлемі – 12215 м³; пәтерлердің жалпы ауданы – 4887 м²; жазғы үй-жайлары жоқ пәтерлердің ауданы – 4797 м²; ғимараттың пәтерлеріндегі тұрғын бөлмелердің ауданы – 3039 м²; ас үйдің еден ауданы 1848 м²; сыртқы қабырғалар ауданы – 2302 м², жертөле жабыны ауданы – 1209 м², жаппа ауданы – 1209 м², сыртқы есіктер: ауданы – 12 м², пәтерлердің терезе бетерінің ауданы – 616 м², оның ішінде асуылардегі терезелердің ауданы – 463 м²; баспалдақ-лифт тораб терезелерінің ауданы – 40,3 м², тұрғындардың есептік саны 270 адам; ғимараттың биіктігі – 14 м; қабаттың биіктігі – 2,5 м; термостатсыз және кіріске авторегуляциясыз жүйе – 0,5. Пәтерлердің терезелері мен әртүрлі бағыттағы кіріктірілген тұрғын емес қабат беттерінің ауданы: сол-түстік пен оңтүстікке – 17 м²; шығысқа – 286,6 м²; батысқа – 295,2 м². Әртүрлі бағыттағы терезелер үшін күн радиациясының қарқындылығы: солтүстікке – 248 кВт·сағ/м²; шығысқа және батысқа – 406 кВт·сағ/м²; оңтүстікке – 687 кВт·сағ/м².

Ғимараттың сыртқы қоршау құрылымдарының жылу техникалық деректері: сыртқы қабырғалардың берілген жылу беру кедергісі – 0,66 м²·°C/Вт; жертөле жабыны үшін – 1,69 м²·°C/Вт; жаппа – 1,63 м²·°C/Вт; сыртқы есіктер – 0,42 м²·°C/Вт, $\tau = 0,7$, $k = 0,6$; терезелердің ауа өткізуге кедергісі – 0,1 м² · сағ / кг, $k = 0,62$, $\tau = 0,75$.

Қаралып отырған тұрғын үйді жылыту кезеңінде жылытуға және желдетуге жұмсалатын жылу энергиясының нормаланатын (базалық) үлестік сипаттамасы талапқа сәйкес $q_{\text{нreq}} = 0,359 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ немесе 135,4 кВт·сағ/м² аспауы тиіс.

Астана қаласы үшін жылыту кезеңінің градус-тәулік шамасы:

$$Q_{\text{tr}}^y = 0,024 D d \sum_i \frac{1}{R} A_i n = 908817,6 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$$

Жарық өткізгіш құрылымдардың жылу сипаттамаларын бағалау және талдау нәтижелерін толыққанды салыстыру мақсатында бастапқы деректер, климаттық және геометриялық параметрлер жоғарыда көрсетілгендей, ал жарық өткізгіш құрылымдардың түрлері мен жылу параметрлері төменде көрсетілгендей қабылданды:

1) Қазіргі кезде елімізде негізгі тұрғын үй қорын құрайтын өткен ғасырда салынған, күрделі жөндеуден өтпеген ескі ғимараттардың жарық өткізгіш құрылымдарын заманауи энергетикалық тиімді жарықөткізгіш құрылымдармен ауыстыру әсерін анықтау (1 мен 2-нұсқалар).

2) Жаңадан жобаланатын және салынатын ғимараттардың жарық өткізгіш құрылымдарының орнына заманауи энергетикалық тиімді жарық өткізгіш құрылымдарын қабылдау әсерін анықтау.

Осы мақсаттарға жету үшін есептеу кезінде келесідей талаптар мен нұсқалар қабылданды:

1-нұсқа (тұрғын үй қорын құрайтын күрделі жөндеуден өтпеген ғимараттарға арналған қолданыстағы шешім). Бұл нұсқада бағалау және талдау үшін сыртқы қабырғалардың, жабындар мен жаппалардың жылу техникалық көрсеткіштері 2000 жылдарға дейін қолданыста болған кеңес дәуірінің нормативтік мәндеріне сай қабылданды. Ескі ғимараттарға орнатылған, қазіргі талаптарға сай келмейтін жарық өткізгіш құрылымдардың есептеу кезінде қабылданған сипаттамалары: $R_F = 0,42 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $k = 0,6$; $\tau = 0,7$.

2-нұсқа (ұсынылған шешім). Бұл нұсқада сыртқы қабырғалардың, жабындар мен жаппалардың жылу техникалық көрсеткіштері 1-нұсқадағыдай қабылданып, тек жарықөткізгіш құрылымдарды ауыстырумен шектелді. Ескі ғимараттарға орнатылған, қазіргі талаптарға сай келмейтін жарық өткізгіш құрылымдардың орнына қайта орнатуға ұсынылған заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдардың жылу техникалық талабына сай қабылданған сипаттамалары: $R_F = 1,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; $k = 0,68$; $\tau = 0,8$.

3-нұсқа (жаңадан жобаланып салынатын ғимараттарға арналған қолданыстағы шешім). Бұл нұсқада сыртқы қабырғалардың, жабындар мен жаппалардың жылу техникалық көрсеткіштері есеп жүргізілген 2015 жылғы нормативтік мәндерге сай қабылданды. Шартты ғимараттың жарықөткізгіш құрылымдарының есептеу кезінде қабылданған сипаттамалары: $R_F = 0,62 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}$, $k = 0,48$; $\tau = 0,8$.

4-нұсқа (ұсынылған шешім). Бұл нұсқада сыртқы қабырғалардың, жабындар мен жаппалардың берілген жылу беру кедергісілері 3-нұсқадағыдай қабылданды. Жаңадан жобаланып салынатын ғимараттарға ұсынылған заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдардың күшейтілген жылу техникалық талабына сай қабылданған жылу техникалық сипаттамалары: $R_F = 1,0 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}$; $k = 0,68$; $\tau = 0,8$.

Нәтижелер және оларды талқылау. Шартты тұрғын үйдің энергия тиімділігін бағалау және талдау үшін жылыту мен желдетуге арналған жылу тұтынудың нақты көрсеткіші жоғарыда көрсетілген әдістеме бойынша орындалып нәтижелері мен талқылау төменде көрсетілді.

1-нұсқа бойынша. Жылыту кезеңінде сыртқы қоршау құрылымдары арқылы ғимараттың жылу шығыны:

$$Q_{\text{тр}}^y = 0,024D \sum_i \frac{1}{R} A_i n = 908817,6 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Ескі терезелердің ауа өткізуге кедергісі:

$$R_{a.F} = 0,57 \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{2}{3}} = 0,1 \text{ м}^2 \cdot \text{сағ} / \text{кг}.$$

$t_{ht} = -8,1^\circ\text{C}$ және $v = 5,9 \text{ м/с}$ кезінде бір пәтер үшін жабық терезелердегі пәтердегі инфильтрацияның минималды қажетті мөлшері $G_{\text{запр.кв}} = 175 \text{ кг/сағ}$:

$$G_{inf}^{\text{мин}} = 3,6A_{r \text{ ср}} + G_{\text{запр.кв}} \beta_{Fi} \left(\frac{A_{F.kyx}}{A_{F.кв}} \right) = 300,7 \text{ кг/сағ}.$$

$$3 \text{ м/с және } G_i^{\text{min}} / G_{\text{запр.кв}} \cdot \beta_H \text{ болған кезде} = 1,3 \text{ м}^2 \cdot \text{сағ} / \text{кг}.$$

Бір пәтердің терезелері арқылы инфильтрацияның орташа мәні (ғимарат бойынша):

$$G_{inf \text{ кв}} = G_{\text{запр кв}} \beta_{Fi} \beta_H = 309,8 \text{ кг/сағ}$$

$$G_{inf \text{ ллу}} = 93 \text{ кг / сағ кезінде } A_{F \text{ ллу}} = 1,7 \text{ м}^2.$$

Тұрғын ғимараттағы ауа ағыны:

$$G_{inf} = G_{inf \text{ кв}} K_{кв} + (0,57 - 0,00172 t_{ht}) G_{inf \text{ ллу}} (N - 1) N' = 29461,4 \text{ кг} \cdot \text{сағ}$$

Пәтерлердегі ауаның қажетті ауа алмасуымен салыстырғанда қосымша инфильтрациясын ескеретін коэффициент:

$$k_v = \frac{G_{inf}}{3,6A_{r \text{ ср}} K_{кв}} = \frac{G_{inf}}{3,6A_r} = 2,7$$

Жылыту кезеңіндегі инфильтрацияны ескергендегі желдету ауа алмасуы есебінен ғимараттың жылу шығыны:

$$Q_{inf}^y = 6,7 \cdot 10^{-3} (L_v K_v + L_{v.o}) c_v P_a^{ht} D_a = 1306063 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$$

Тұрмыстық жылу ағындарының үлестік шамасын ескере отырып, тұрмыстық жылу бөлу ($q_{int} = 17 \text{ Вт/м}^2$ кезінде):

$$Q_{inf}^y = 0,024 q_{inf} Z_{inf} A_r = 267821 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$$

Ескі терезелер арқылы күн радиациясынан жылу түсуінің үлестік сипаттамасы:

$$Q_5^y = \tau_F k_F \sum_{k=1}^8 A_{F.кв} I_k = 109717,8 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$$

Жылыту кезеңіндегі ғимаратты жылытуға және желдетуге арналған жылу энергиясының мөлшері тек орталық жылу торабында жылу беруді автоматты реттеу болған кезде ($\zeta = 0,5$):

$$Q_h^y = [Q_{tr}^y + Q_{inf}^y - (Q_{int}^y + Q_5^y) \nu \zeta] \beta_h = 2321502,1 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}$$

Ескі терезелері бар шартты тұрғын үйді жылытуға және желдетуге жылу энергиясының мөлшерін есептеу нәтижесінде жылу энергиясының меншікті шығыны тең болады:

$$q_h^y = \frac{Q_h^y}{A_h} = 483,9 \text{ кВт} \cdot \text{сағ} / \text{м}^2$$

Демек, ескі терезелері бар және күрделі жөндеуден өтпеген шартты тұрғын үй энергия үнемдеу талаптарына сәйкес келмейді.

2-нұсқа бойынша: Бұл нұсқада сыртқы қабырғалардың, жабындар мен жаппалардың берілген жылу беру кедергісі 1-нұсқадаға сай. Шартты ғимараттың ескі жарықөткізгіш құрылымдарын заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарға ауыстыру іс-шараларын орындау кезінде, желдету және орнату режимінде ашуға мүмкіндік беретін айналмалы-жиналмалы механизмін ескеру қажет.

Бұл ретте жылыту кезеңінде сыртқы қоршау құрылымдары арқылы ғимараттың жылу шығыны:

$$Q_{tr}^y = 0,024 D_d \sum_i \frac{1}{R_i} A_i n = 669754,9 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Ғимараттың ескі терезелерін ауыстыру есебінен сыртқы қоршау құрылымдары арқылы жылу шығынын азайту 239062,6 кВт·сағ немесе 26,3% құрайды.

Жылыту кезеңіндегі инфильтрацияны ескере отырып, желдету ауа алмасуы есебінен ғимараттың жылу шығыны.

Баспалдақ-лифт торабының терезелері мен кіреберіс есіктеріндегі сыртқы және ішкі ауа қысымының есептік айырмасы:

$$\Delta P_{\text{ФЛЛУ}} = 0,28H(\gamma_{ht} - \gamma_{int}) + 0,03\gamma_{ht}v^2 = 19,1 \text{ Па};$$

$$\Delta P_{ed} = 0,55H(\gamma_{ht} - \gamma_{int}) + 0,03\gamma_{ht}v^2 = 24,3 \text{ Па}.$$

Тұрғын үй алаңының м^2 үшін 3,6 кг/сағ ауа алмасу нормасын қабылдай отырып, ғимараттың пәтерлерінде қажетті ауа алмасу:

$$G_{inf \text{ кв}} = 10940,4 \text{ кг/сағ}.$$

Пәтерлердегі ауа алмасумен салыстырғанда ғимараттағы ауаның қосымша инфильтрациясын ескеретін кв коэффициенті:

$$k_v = \frac{G_{inf}}{3,6A_r \text{ кв} K_{кв}} = \frac{G_{inf}}{3,6A_r} = 1,0$$

Жылыту кезеңіндегі инфильтрацияны ескере отырып, желдету ауа алмасуы есебінен ғимараттың жылу шығыны:

$$Q_{inf}^y = 6,7 \cdot 10^{-3} G_{inf \text{ кв}} k_v c_v D_d = 485002,6 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Сәйкесінше, шартты ғимараттың ескі жарықөткізгіш құрылымдарын заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарға ауыстыру іс-шараларын орындау (инфильтрацияны ескере отырып) желдету жылу шығынын 821060,4 кВт·сағ азайтады немесе пайыздық тұрғыда алғанда үнемдеу 62,9 % құрайды.

Тұрмыстық жылу ағындарының үлестік шамасын ескере отырып, тұрмыстық жылу бөлу:

$$Q_{inf}^y = 0,024q_{int}z_{int}A_r = 267821 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Күн радиациясынан жылу қабылдау:

$$Q_5^y = \tau_F k_F \sum_{k=1}^8 A_{F.кв} I_k = 128358 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Сандық тұрғыдан алғанда, заманауи энергия тиімді терезелер арқылы күн радиациясынан жылу түсуін ескергендегі үнемдеу 18640,2 кВт / сағ немесе 14,5% құрайды.

Жылыту кезеңінде ғимаратты жылытуға және желдетуге жұмсалған жылу энергиясының мөлшері:

$$Q_h^y = [Q_{tr}^y + Q_{inf}^y - (Q_{int}^y + Q_5^y)v\zeta]\beta_h = 1114611,1 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Сандық тұрғыдан алғанда, жылыту кезеңінде жылытуға және желдетуге жұмсалған жылу энергиясының мөлшері 1206891 кВт / сағ немесе 52% - ға азаяды.

Ескі ғимараттарға орнатылған, қазіргі талаптарға сай келмейтін жарық өткізгіш құрылымдардың орнына заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарды орнатқан кездегі шартты ғимараттың жылу энергиясының нақты есептік шығыны:

$$q_h^y = \frac{Q_h^y}{A_k} = 232,4 \text{ кВт} \cdot \text{сағ} / \text{м}^2.$$

Демек, жылыту кезеңінде ескі ғимараттардың жарық өткізгіш құрылымдарын заманауи энергетикалық тиімді жарықөткізгіш құрылымдармен ауыстыру шартты тұрғын үйді жылытуға және желдетуге арналған жылу энергиясының нақты есептік шығынын 251,6 кВт·сағ/м² немесе 2 есе азайтуға мүмкіндік береді.

Ескерту: қарастырылып отырған тұрғын үйдің энергия тиімділігінің жоғары деңгейіне қол жеткізу үшін кешенді тәсіл қажет (мысалы: едендерді, қабырғаларды, шатырды окшаулау және жылу тұтынуды реттеудің автоматтандырылған жүйелерін орнату, т.б.).

Ескі ғимараттарға орнатылған қолданыстағы талаптарға сай келмейтін жарық өткізгіш құрылымдарды заманауи энергия тиімді жарық өткізгіш құрылымдарға ауыстыру бойынша іс-шараның өтелу мерзімін анықтау (1-2 нұсқалар).

Энергия тиімді терезелер өндірісінің жалпы бағасы нарықтың барлық қатысушылары арасында бәсекелестік процесінде қалыптасады. Жоғарыда көрсетілген әдістеме арқылы терезелерді энергия тиімді нұсқаға ауыстыруға кететін іс-шараның өтелу мерзімін есептеу үшін инвестициялар мен отынның құнын білу керек.

Ескі үйлерге қойылған тиімсіз терезелер қойылған ($R_r=0,42 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$, $R_a=0,1 \text{ м}^2 \cdot \text{сағ} \cdot \text{Па} / \text{кг}$; $t_{ht} = -8,1 \text{ °C}$ және $\gamma = 5,9 \text{ м} / \text{с}$ болған жағдайда) шартты тұрғын үйдің жылу энергиясын тұтынуы $Q_{tr} = 550 \text{ Гкал}$ және инфильтрация арқылы келетін сыртқы ауаны жылытуға жұмсалатын жылу энергиясының шығыны $Q_{inf} = 1320 \text{ Гкал}$. Тиісінше, 1-нұсқада шартты тұрғын үйдің жылу шығындарын өтеу үшін жылу энергиясын тұтыну $Q_{т3} = 550 + 1320 = 1870 \text{ Гкал}$.

Осы үйге $R_r = 1,0 \text{ м}^2 \cdot \text{°C} / \text{Вт}$ тең келетін заманауи энергия тиімді терезелер қойған кездегі жылу энергиясының шығыны $Q_{tr} = 231 \text{ Гкал}$. Энергия тиімді терезе $R_a = 0,8 \div 0,9 \text{ м}^2 \cdot \text{сағ} \cdot \text{Па} / \text{кг}$ болғанда инфильтрация арқылы келетін сыртқы ауаны жылытуға жұмсалатын жылу энергиясының шығыны $Q_{inf} = 147 \text{ Гкал}$. Тиісінше, 2-нұсқада энергия тиімді терезелер қойылған шартты тұрғын үйдің жылу шығындарын өтеу үшін жылу энергиясын тұтыну $Q_{т3} = 231 + 147 = 378 \text{ Гкал}$.

Осылайша, шартты тұрғын үйдің жылу энергиясын жылдық үнемдеу энергия тиімді терезелер қолданған кезде $\Delta Q_{т3} = 1870 - 378 = 1492 \text{ Гкал}$ құрайды.

Жылу энергиясын тұтынудың төмендеуінен отын үнемдеу ($k_{\text{пот}}^{\text{тэ}}=1,5$ және $b_{\text{тэ}} = 200$ кг ш.о./Гкал) $\Delta\dot{Q}_{\text{т}} = 303$ ш.о.т.

Отынның негізгі түрі тас көмірдің тоннасы есеп жүргізілген 2015 жылғы баға бойынша 6741 теңге және энергия тиімді терезелердің орташа құны 14742555 теңге, терезе өндірушілер берген 15% жеңілдікпен 13441123 теңге деп қабылданды. Шартты тұрғын үйде заманауи энергия тиімді жарық өткізгіш құрылымдарын ауыстырудың қарапайым өтелу мерзімі $T_{\text{ок}} = K / (\Delta\dot{Q}_{\text{т}} \cdot C_{\text{отын}}) = 11,2$ жылға тең болады (15% жеңілдікпен – 10,2 жыл). Осы ретте көмірдің құны 50% қымбаттауы мүмкіндігін болжамдай отырып (<https://informburo.kz>) өтелу мерзімінің қысқаруын $T_{\text{ок}} = 5$ жыл деп күтуге болады.

Жоғарыда жүргізілген техникалық-экономикалық есептеу нәтижелері бойынша салынған инвестициялардың өтелу мерзімі 5÷11 жылды құрайды.

3-нұсқа (қолданыстағы шешім) бойынша.

Бұл нұсқада ғимараттың сыртқы қоршау құрылымдарының берілген жылу беру кедергілері есеп жүргізілген кездегі нормативтік мәндерге сәйкес келесідей қабылданды: сыртқы қабырғалар үшін – $R_w = 3,6 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; терезелер мен есіктер үшін $R_F = 0,62 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; жертөле жабыны үшін – $R_f = 4,7 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$; жабын үшін – $R_c = 5,3 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$. Жылу беру-термостаттары бар пәтердің көлденең сымдары.

Бұл ретте жылыту кезеңінде сыртқы қоршау құрылымдары арқылы кететін ғимараттың жылу шығыны:

$$Q_{tr}^y = 0,024 D_d \sum_i \frac{1}{R_i} A_i n = 303108,1 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Жылыту кезеңіндегі инфильтрацияны ескере отырып, желдету ауа алмасуы есебінен ғимараттың жылу шығыны:

$$Q_{inf}^y = 6,7 \cdot 10^{-3} G_{inf.kb} k_v c_v D_d = 485002,6 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Тұрмыстық жылу ағындарының үлестік шамасын ескере отырып, тұрмыстық жылу бөлу:

$$Q_{inf}^y = 0,024 q_{int} z_{int} A_r = 267821 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Күн радиациясынан жылу қабылдау:

$$Q_5^y = \tau_F k_F \sum_{k=1}^8 A_{F.kb} I_k = 90605,7 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Жылыту кезеңінде ғимаратты жылытуға және желдетуге жұмсалған жылу энергиясының мөлшері:

$$Q_h^y = [Q_{tr}^y + Q_{inf}^y - (Q_{int}^y + Q_5^y) v \zeta] \beta_h = 566547,4 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Жаңадан жобаланып салынатын ғимараттарға 2015 жылғы нормативтік мәндерге сай (ҚРҰҚ 2012 жыл 8 желтоқсан №1117) қоршау құрылымдарын орнатқан кездегі шартты ғимараттың жылу энергиясының нақты есептік шығыны:

$$q_h^y = \frac{Q_h^y}{A_k} = 118,1 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}/\text{м}^2.$$

4-нұсқа (ұсынылған шешім) бойынша: Бұл нұсқада сыртқы қабырғалардың, жабындар мен жаппалардың берілген жылу беру кедергісілері 3-нұсқаға сай. Шартты ғимаратқа нормаланатын жарықөткізгіш құрылымдарының орнына заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарын қабылдаған кезде жылыту кезеңінде сыртқы қоршау құрылымдары арқылы ғимараттың жылу шығыны:

$$Q_{tr}^y = 0,024 D_d \sum_i \frac{1}{R_i} A_i n = 242454,9 \text{ кВт} \cdot \text{сағ}.$$

Желдету жылу шығыны терезе саңылауларының төмен тығыздығымен сипатталып, 485002,6 кВт·сағ. қабылданды

Тұрмыстық жылу ағындарының үлестік шамасын ескере отырып, тұрмыстық жылу бөлу:

$$Q_{inf}^y = 0,024 q_{int} z_{int} A_r = 267821 \text{ кВт} \cdot \text{сағ.}$$

Күн радиациясынан жылу қабылдау:

$$Q_5^y = \tau_F k_F \sum_{k=1}^8 A_F I_k = 128358 \text{ кВт} \cdot \text{сағ.}$$

Сандық тұрғыдан алғанда, күн радиациясынан жылу беру есебінен үнемдеу 37752,4 кВт·сағ немесе 29,4% құрайды.

Жылыту кезеңінде ғимаратты жылытуға және желдетуге жұмсалған жылу энергиясының мөлшері:

$$Q_h^y = [Q_{tr}^y + Q_{inf}^y - (Q_{int}^y + Q_5^y) v \zeta] \beta_h = 498009,3 \text{ кВт} \cdot \text{сағ.}$$

Сандық тұрғыдан алғанда, жылыту кезеңінде ғимаратты жылытуға және желдетуге жұмсалған жылу энергиясының мөлшері 68538,1 кВт / сағ немесе 12% - ға азаяды.

Қазіргі заманғы энергия тиімді терезелерге көшкен кезде жылу энергиясының нақты есептік шығыны:

$$q_h^y = \frac{Q_h^y}{A_k} = 103,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2.$$

Сандық тұрғыдан алғанда, қазіргі заманғы энергия тиімді терезелерге көшу есебінен шартты тұрғын үйдің жылыту кезеңінде жылытуға және желдетуге арналған жылу энергиясының нақты есептік шығыны 14,3 кВт·сағ/м² немесе 12% - ға азаяды.

Ескерту: энергияны үнемдейтін терезелерде микро желдетілетін терезе жабдықтары болған кезде және ғимаратта жылу тұтынуды реттеудің автоматтандырылған жүйелерін орнатқан кезде үлкен үнемдеуге қол жеткізуге болады. Әйтпесе, пәтерлердегі тұрғындар терезелерді үнемі ашық ұстайды және пәтерлердегі температураны 18÷21°C орнына 24÷27°C шегінде ұстау қажет болады.

Жаңадан жобаланатын әрі салынатын ғимараттардың нормативті жарық өткізгіш құрылымдарының орнына заманауи энергия тиімді жарық өткізгіш құрылымдарға көшіру бойынша іс-шараның өтелу мерзімін анықтау (3-4 нұсқалар).

Нормативтік талаптарға сәйкес келетін ($R_r = 0,62 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$) терезе қойылған шартты тұрғын үйдің жылу энергиясын тұтынуы $Q_{tr} = 372 \text{ Гкал}$. Қазіргі уақытта $R_a = 0,2 \text{ м}^2 \cdot \text{сағ} \cdot \text{Па/кг}$ болған жағдайда инфильтрация арқылы түсетін сыртқы ауаны жылытуға жұмсалатын жылу энергиясының шығыны $Q_{inf} = 660 \text{ Гкал}$ құрайды.

Тиісінше, 3-нұсқада шартты тұрғын үйдің жылу шығындарын өтеу үшін жылу энергиясын тұтыну $Q_{tr} = 1032 \text{ Гкал}$.

Қазіргі заманғы энергия тиімді терезелерге көшкен кезде жылу энергиясының шығыны $Q_{tr} = 231 + 147 = 378 \text{ Гкал}$ (жоғарыдан қараңыз). Осылайша, энергия тиімді терезе енгізуден шартты тұрғын үйдің жылу энергиясын жылдық үнемдеуі 654 Гкал құрайды.

Жылу энергиясын тұтынудың төмендеуінен отын үнемдеу $\Delta \text{Эт} = 133 \text{ ш.о.т.}$

Энергия тиімді терезелерге көшу кезінде энергия тиімді терезелер құнының айырмасы ескерілді, олар есеп жүргізілген кездегі бағаларға сәйкес 2531996 теңгені құрады (15 %-ға жеңілдікті ескерсек – 2288690 теңге) деп қабылданды. Терезелердің құны терезе өндірушілерінің прайс-парақтары бойынша анықталды. Айта кететін болсақ энергия тиімді терезелер өндірісінің бағасы нарықтың барлық қатысушылары арасында бәсекелестік процесінде қалыптастырылады.

Қазақстанның жылу өндірісінде көмір стратегиялық тауар болып табылады. Тас көмірдің құны тоннасына 6741 теңге болған кезде және қазіргі заманғы энергия тиімді терезелерге көшкен кезде шартты тұрғын үйдің мысалында қарапайым өтелу мерзімі:

$$T_{OK} = K / (\Delta \dot{E}_T \cdot C_{топл}) = 2,8 \text{ жыл (15\% жеңілдікті ескергенде – 2,5 жыл)}.$$

Жанармай/көмір бағасының өсуімен, реттеуші шаралар аясында жылу тарифтері де көтерілетіні белгілі. Осылайша, көмірдің құны 50% қымбаттаған кезде, өтелу мерзімінің қысқаруын $T_{OK} = 1$ жыл деп күтуге болады.

Қорытынды. Қаралып отырған тұрғын үйді жылыту кезеңінде жылытуға және желдетуге жұмсалатын жылу энергиясының нормаланатын (базалық) үлестік сипаттамасы талапқа сәйкес $q_h^{req} = 0,359 \text{ Вт/(м}^3 \cdot ^\circ\text{C)}$ немесе $135,4 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/м}^2$ аспауы тиіс (ҚРҰҚ 2012 жылғы 11 қыркүйектегі №1181).

Күрделі жөндеуден өтпеген және ескі терезелері бар шартты тұрғын үйді жылытуға және желдетуге жылу энергиясының мөлшерін есептеу нәтижесінде жылу энергиясының меншікті шығыны $483,9 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/м}^2$, демек энергия үнемдеу талаптарына мүлдем сәйкес келмейді (ҚРҰҚ 2012 жыл 8 желтоқсан №1117). Осы ғимараттарға орнатылған жарық өткізгіш құрылымдардың орнына заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарды орнатқан кездегі шартты ғимараттың жылу энергиясының нақты есептік шығыны $483,9 - 232,4 = 251,5 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/м}^2$ немесе 2 еседей азаяды.

1 мен 2 нұсқалар бойынша жүргізілген техникалық-экономикалық есептеу нәтижелері ескі жарық өткізгіш құрылымдардың орнына заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарды орнатуға салынатын инвестициялардың өтелу мерзімі 5÷11 жылды құрайтынын көрсетті.

Жаңадан жобаланып салынатын ғимараттарға 2015 жылғы нормативтік мәндерге сай қоршау құрылымдарын орнатқан кездегі шартты ғимараттың жылу энергиясының нақты есептік шығыны $118,1 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/м}^2$ құрады. Осы ғимартақа қойылған жарық өткізгіш құрылымдардың орнына заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарды орнатқан кездегі шартты ғимараттың жылу энергиясының нақты есептік шығыны $103,8 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/м}^2$ құрайды. Сандық тұрғыдан алғанда, заманауи энергия тиімді терезелерге көшу есебінен шартты тұрғын үйдің жылытуға және желдетуге арналған жылу энергиясының нақты есептік шығыны $14,3 \text{ кВт} \cdot \text{сағ/м}^2$ немесе 12% - ға азаяды.

Жоғарыда көрсетілген 3 пен 4 нұсқаларды ескере отырып жаңадан жобаланып салынатын ғимараттарға заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарға көшу жөніндегі іс-шараларға салынған инвестициялардың өтелу мерзімі салыстырмалы есептеулер жүргізген кезде техникалық-экономикалық есептеу нәтижелері бойынша 1÷2,8 жылды құрады.

Жүргізілген техникалық-экономикалық есептеу нәтижелері ескі жарық өткізгіш құрылымдардың орнына заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарды орнатуға салынатын инвестициялардың өтелу мерзімі 5÷11 жылды және жаңадан жобаланып салынатын ғимараттарға заманауи энергия тиімді жарықөткізгіш құрылымдарға көшу жөніндегі іс-шараларға салынған инвестициялардың өтелу мерзімі 1÷2,8 жылды құрайтынын көрсетті.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс білдіру. Бұл мақала Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті бағдарламалық-нысаналы қаржыландыру шеңберінде (№BR2882278 гранты, Қазақстан Республикасының құрылыс, жол-құрылыс секторының аккредиттелген қызметтерінің толық циклін көрсету бойынша құрылыс-техникалық инжинирингтік орталық құру») жарыққа шығарылды.

Ғылыми мақаланы жазу процесінде генеративті ЖИ және оның көмегімен технологияны қолдану туралы хабарлама. Бұл жұмысты дайындау кезінде авторлар генеративті ЖИ көмегін аңдатпа жазуға қолданды.

Әдебиеттер тізімі

- Қазақстан Республикасының 2012 жылғы 13 қаңтардағы №541-IV «Энергия үнемдеу және энергия тиімділігін арттыру туралы» Заңы // Law of the Republic of Kazakhstan dated January 13, 2012 No. 541-IV «On Energy Saving and Improving Energy Efficiency».
- МЕМСТ 30494-2011 Тұрғын және қоғамдық ғимараттар. Үй-жайлардағы микроклимат параметрлері // GOST 30494-2011 Residential and public buildings. Microclimate parameters in premises.
- Есенгабулов С.К. (2009). Энергоэффективные наружные стены с организованным воздухообменом. Диссертационная работа на соискание ученой степени кандидата технических наук // Yessengaboulov S.K. (2009). Energy-efficient external walls with organized air exchange. Dissertation for the degree of candidate of technical science.
- Есенгабулов С.К., Дәстенова Г.Д. (2024) Энергоэффективные наружные стены зданий с вентиляционными устройствами, утилизирующими уходящее трансмиссионное тепло. Монография // Yessengaboulov S.K., Dastanova G.D. (2024) Energy-efficient external walls of buildings with ventilation devices utilizing outgoing transmission heat. Monograph.
- С.К. Есенгабулов, Е.Б. Жаркенов, М.С. Кожакмет, М.Н. Нұрбаева, А.Е. Джексембаева. (2024). Киіз үй тәрізді және шаршы пішіндес ғимараттарды энергия тиімділікке әсерін салыстырмалы талдау. Д. Серікбаев атындағы ШҚТУ хабаршысы», № 3 // S.K. Yessengaboulov, E.B. Zharkenov, M.S. Kozhakhmet, M.N. Nurbayeva, A.E. Jexsembayeva. (2024). Comparative analysis of the impact of yurt-shaped and square-shaped buildings on energy efficiency. Bulletin of D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University, № 3.
- Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2013 жылғы 29 тамыздағы № 904 қаулысы // Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan № 904 of August 29, 2013.
- Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2014 жылғы 28 маусымдағы № 728 қаулысы // Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan № 728 of June 28, 2014.
- Есенгабулов С.К. (2015). Справочник «Как правильно выбрать энергоэффективные окна». ПРООН // Yessengaboulov S.K. (2015). Handbook "How to choose energy-efficient windows". UNDP.
- ҚР ҚН 2.04-21-2004* Азаматтық ғимараттарды энергия тұтыну және жылудан қорғау // CN RK 2.04-21-2004* Energy consumption and heat protection of civil buildings.
- МҚЕ 24-01-2011 Ғимараттарды жылудан қорғау // IBR 24-01-2011 Thermal protection of buildings.
- АВОК (2011). Руководство по расчету теплопотребления эксплуатируемых жилых зданий // AVOK (2011). Guide to calculating heat consumption of residential buildings in operation/
- Есенгабулов С.К., Қожахмет М.С., Сабитов Е.Е. (2024). Азаматтық ғимараттарды жылу-техникалық жобалау. Оқу құралы // Yessengaboulov S.K., Kozhakhmet M.S., Sabitov E.E. (2024). Thermal engineering design of civil buildings. Textbook.
- Белый А. (2015). Почему выгодно строительство энергоэффективных зданий. ПРООН/ГЭФ // Bely A. (2015). Why is it profitable to build energy-efficient buildings. UNDP/GEF.
- <https://informburo.kz/News/otpusknaya-cena-uglya-s-shaht-ne-izmenilas-No-na-rynke-ugol-za-god-podorozhal-na-19.html>
- Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2012 жылғы 8 желтоқсандағы № 1117 қаулысы // Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 1117 of December 8, 2012.
- Қазақстан Республикасы Үкіметінің 2012 жылғы 11 қыркүйектері № 1181 қаулысы // Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 1181 dated September 11, 2012.

Information about authors

Yessengaboulov Serikbolat – candidate of technical sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: serik-y@mail.ru, ORCID: 0000-0002-2281-8132, +7 777 529 41 18

Kozhakhmet Meiram Saginbaiuly – L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: meiram_kms@mail.ru

Zharkenov Yerkebulan Berdenovich – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: berdenovich@gmail.com

Abakanov Yeldos – L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: eldos_abakanov@mail.ru

Zhankeldi Meir – student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: meirzhankeldi@gmail.com

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_226
MFTAA 67.07.01

А.Ш. Кайдаров¹, Г.А. Карабаев¹, С.Э. Мамедов²

¹С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Астана қ., Қазақстан
E-mail: norach_98@mail.ru

E-mail: karabaew88@mail.ru*

²Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан
E-mail: sp_proekt_stroy@bk.ru

ҚАСБЕТТЕРДІҢ КЛИНИНГІ – ҚАЛАНЫҢ ЭСТЕТИКАЛЫҚ КЕЛБЕТІН САҚТАУ РЕТІНДЕГІ ӘДІС

КЛИНИНГ ФАСАДОВ, КАК МЕТОД СОХРАНЕНИЯ ЭСТЕТИЧЕСКОГО ОБЛИКА ГОРОДА

FACADE CLEANING AS A METHOD OF PRESERVING THE AESTHETIC APPEARANCE OF A CITY

Аңдатпа. Ғимаратқа және қоршаған ортаға күтім жасаудың белгілерінің бірі – құрылымның эстетикалық жағымды көрінісі. Әлбетте, ғимараттың эстетикалық таза келбеті көрерменге жағымды эмоциялар мен әсер қалдырады, жағымды визуалды көрініс және жайлы қалалық ортаны қалыптастырады. Таза қасбет құрылымның барлық ерекшеліктерін, оның үйлесімді пропорциясын, түс шешімінің бірегейлігі мен ерекшелігін, әрлеу материалдары мен бөлшектерінің құрылымын көрсететінін айта кету керек. Эстетикалық таза қасбет – бұл жаңадан салынған ғимаратты одан әрі оң қабылдаудың негізгі аспектісі, өйткені уақыт өте келе қасбетте ғимараттың жақсы ойластырылған пропорциялары мен үйлесімді формаларын көзбен жасыра алатын әртүрлі сипаттағы ласпанулар жиналады, бұл тартымсыз көрініске әкелуі мүмкін және ғимараттың сәулеттік-көркемдік бейнесін бұзады. Осылайша, қазіргі кезеңде жаңа және қолданыстағы ғимараттарды тұрақты пайдалануға қол жеткізу үшін ғимараттарға жан-жақты көшенді қызмет көрсету керек, оның ішіне қасбетті тазарту да жатады. Мақалада тұрағын үйлердің, шағын және орта қабатты ғимараттардың қасбеттерін үнемі маусымдық тазарту қажеттілігі қарастырылады. Ғимараттардың қасбеттерінде тазарту шараларын жүргізу қажеттілігінің негізгі аспектілері қарастырылған. Құрылымның қасбеттерін үнемі тазалаудың оң жақтары анықталды. Ғимараттың жағымды эстетикалық көрінісін сақтау бойынша шаралар мен практикалық ұсыныстар анықталды. Ғимараттардың таза қасбетінің көрнекі артықшылықтары орнатылған. Зерттеу нәтижелері тұрағындардың психологиялық және эмоционалдық әл-ауқатын жақсарту үшін құрылымның жақсы эстетикалық көрінісін сақтау және қамтамасыз ету қаншалықты маңызды екенін көрсетеді. Осылайша, ғимараттың эстетикалық келбетін жоғары деңгейде ұстау және сақтау қала құрылысы мен сәулет саласындағы маңызды аспект болып табылады. Ғимараттың эстетикасы қаланың жалпы келбетін қалыптастыруда шешуші рөл атқарады және тұрағындардың кеңістікті қабылдауына айтарлықтай әсер етеді.

Түйін сөздер: Клининг, эстетика, жаңғырту, ғимараттың келбеті, қоршаған орта, сәулет, ғимараттың қасбеті.

Аннотация. Одним из признаков заботы о здании и окружающей среде является эстетический приятный внешний вид строения. Несомненно, эстетический чистый внешний облик строения, вызывает положительный эмоции и впечатления у зрителя, формирует благоприятный визуальный облик и создает комфортную городскую среду. Стоит отметить, что чистый фасад демонстрирует все особенности строения, его гармоничную пропорцию, уникальность и особенность цветового решения, текстуру материалов отделки и деталей. Эстетический чистый фасад – это ключевой аспект дальнейшего положительного восприятия вновь возведенного здания, ведь со временем на фасаде накапливается загрязнения различного характера, которые могут визуально скрыть хорошо продуманные пропорции и гармоничные формы здания, что может привести к не привлекательному внешнему виду и нарушить архитектурно-художественный облик.

жественный образ строения. Таким образом, на современном этапе, для достижения устойчивой эксплуатации новых и существующих строений, необходим комплексный подход по обслуживанию зданий в том числе и чистка фасада. В статье затрагивается вопрос о необходимости регулярной сезонной чистки фасадов жилых домов, малых и средне этажных зданий. Рассмотрены основные аспекты необходимости проведения клининговых мероприятий на фасадах зданий. Выявлены положительные стороны регулярной чистки фасадов строения. Определены меры и практические предложения по поддержанию приятного эстетического внешнего вида зданий. Установлены визуальные преимущества чистого фасада зданий. Результаты исследования демонстрируют, насколько важным является поддержание и обеспечение хорошего эстетического вида строения для улучшения психологического и эмоционального благополучия жителей. Таким образом поддержание и сохранение эстетического облика здания на высоком уровне – это важный аспект в области современного градостроительства и архитектуры. Эстетика здания играет ключевую роль в формировании общего облика города, а также оказывает существенное влияние на восприятие пространства жителями.

Ключевые слова: Клининг, эстетика, реставрация, облик здания, окружающая среда, архитектура, фасад здания.

Abstract. One of the signs of caring for the building and the environment is the aesthetic appearance of the structure. Undoubtedly, the aesthetically clean exterior of the building evokes positive emotions and impressions in the viewer, forms a favorable visual appearance and creates a comfortable urban environment. It is worth noting that the clean facade demonstrates all the features of the structure, its harmonious proportion, uniqueness and feature of the color scheme, the texture of the finishing materials and details. An aesthetically clean facade is a key aspect of the further positive perception of a newly erected building, because over time, various types of pollution accumulate on the facade, which can visually hide the well – thought-out proportions and harmonious shapes of the building, which can lead to an unattractive appearance and disrupt the architectural and artistic image of the building. Thus, at the present stage, in order to achieve sustainable operation of new and existing buildings, an integrated approach to building maintenance is needed, including facade cleaning. The article discusses the need for regular seasonal cleaning of facades of residential buildings, low- and medium-rise buildings. The main aspects of the need for cleaning the facades of buildings are considered. The positive aspects of regular cleaning of building facades have been revealed. Measures and practical suggestions have been identified to maintain a pleasant aesthetic appearance of the building. The visual advantages of a clean facade of buildings were established. The results of the study demonstrate how important it is to maintain and ensure a good aesthetic appearance of the building in order to improve the psychological and emotional well-being of residents. Thus, maintaining and preserving the aesthetic appearance of a building at a high level is an important aspect in the field of urban planning and architecture. The aesthetics of a building plays a key role in shaping the overall appearance of a city or district and affects the perception of space by residents.

Keywords: Cleaning, aesthetics, restoration, building appearance, environment, architecture, building facade.

Kіpіcne. Ғимараттардың көрнекі келбетін сақтау мен жақсартудың маңызды процедураларының бірі – ғимараттардың қасбеттерін тазалау және жуу. Қазіргі кезеңде ғимараттардың таза қасбеті қалалық ортаны жақсарту және тұрғындар мен қонақтарға жағымды әсер ету факторларының бірі болып табылады.

Ғимараттардың қасбеттерін тазалаудың өзектілігінің негізгі аспектілері құрылымның эстетикалық көрінісі болып табылады. Таза және жақсы күтілген қасбеттер ғимараттарға тартымды көрініс береді, бұл өмір сүру және жұмыс істеу үшін жағымды ортаны қамтамасыз етеді, бұл біріншіден; екіншісі, ғимараттардың қызмет ету мерзімін ұзарту – қасбеттердің тұрақты тазалануы материалдардың бұзылуын болдырмауға көмектеседі, өйткені шаң, кір және микроорганизмдер ғимарат бетіне зиян келтіруі мүмкін; үшіншісі, экологиялық аспектілер – қасбеттерді таза ұстау қалалық ортадағы ауа сапасын жақсарту арқылы қоршаған ортаға шығарылатын ластаушы заттардың мөлшерін азайтуға көмектеседі.

Меншіктегі объектілерді тиісті түрде қолдау қажеттілігі туралы талаптар «Сәулет, қала құрылысы және құрылыс қызметі туралы» Қазақстан Республикасы Заңының 16-бабында бекітілгенін атап өткен жөн («Сәулет, қала құрылысы және құрылыс қызметі туралы» Қазақстан Республикасының Заңы, 2001).

Айта кету керек, ғимараттардың қасбеттерін тазалаудың өзектілігі урбанистік ортаны жақсарту, сәулеттік мұраны сақтау және қала тұрғындары үшін жайлылық дәрежесін арттыру аясында өткір қабылданады.

Зерттеу шарттары мен әдістері. Бұл жұмысты орындау кезінде зерттеудің түпкілікті нәтижесіне жету үшін қажетті деректерді жинауға және талдауға қойылатын талаптардың жиынтығына негізделген аралас зерттеу құрылымы қолданылды. Осылайша жұмыс барысында келесі әдістер қолданылды:

- жиналған мәліметті талдау (тарихи және теориялық мәліметтер);
- ғимараттардың эстетикалық келбетін заттай зерттеу;
- халықтың психологиялық және әлеуметтік өмірін талдау;
- жалпы ғылыми тәсіл және зерттеу әдістері.

Талдау барысында жалпы қол жетімді теориялық мәліметтер зерттелді, сонымен қатар сәулет, қала құрылысы және дизайн саласындағы әртүрлі онлайн қызметтер кеңінен қолданылды. Заттай зерттеу арқылы ғимараттардың қазіргі кездегі эстетикалық келбеті талданды, ал зерттеудің жалпы ғылыми әдісі өзіндік «аралық әдістеме» ретінде қолданылды.

Пайдаланылған зерттеу әдістері авторға ғимараттардың эстетикалық келбетін жақсарту және сақтау бойынша теориялық және практикалық ұсыныстарды құруға негізделген көзқараспен қарауға мүмкіндік берді, осылайша зерттеудің мақсатына жетуді қамтамасыз етті.

Зерттеу нәтижелері. Қазіргі кезеңде қалалардағы ғимараттар мен құрылыстар қоршаған ортаның келбетін едәуір дәрежеде қалыптастырады. Ғимараттардың эстетикалық келбеті олардың сыртқы түрін, стилін, пропорцияларын, түс гаммасын, сондай-ақ қоршаған құрылыспен өзара әрекеттесуін қамтиды. Функционалдылық пен практикалықпен қатар ғимараттың эстетикалық келбеті адамдарға айтарлықтай психологиялық және эмоционалды әсер ететінін атап өткен жөн.

Ғимараттардың үйлесімді және тартымды эстетикалық келбетіне қол жеткізу үшін сәулетшілер барлық уақытта бірегей сәулеттік стиль, әрлеу және құрылыс материалдарын мұқият таңдау, құрылымдардың құрамы мен пропорцияларының бірлігі, сондай-ақ қоршаған ортаға интеграция сияқты аспектілерді ұстанғаны белгілі. Осылайша, ғимараттарды жобалау кезінде сәулеттік стильді таңдау қаланың жалпы көрнекі көрінісін анықтады. Ғимараттың стилі мен дизайнының қоршаған құрылысқа сәйкестігі біртұтас сәулеттік кескіндеме жасауға ықпал етті. Сапалы материалдарды пайдалану ғимараттардың тартымды көрінісіне ықпал етті. Әртүрлі текстуралар мен материалдардың реңктері арасындағы үйлесімді үйлесім құрылымға ерекше және тартымды көрініс берді. Ғимараттың құрамы мен пропорцияларына баса назар аударылды, ал қоршаған рельеф пен жалпы аумақтарға интеграция сәулет ғимараттарының біртұтас үйлесімін тудырды, бұл тұрғындар үшін қолайлы жағдай туғызды.

Өкінішке орай, уақыт өте келе және қолайсыз климаттық факторлар мен адам қызметінің әсерінен қалалардағы ғимараттар мен құрылыстар бұрынғы тартымды және эстетикалық көрінісін жоғалтады. Шаң, кір, сапалы емес құрылыс-монтаж жұмыстары, адам өмірінің салдары ғимараттар мен құрылыстардың қасбетіне айтарлықтай әсер етеді. Ғимараттың қасбетіне тұрақты емес күтім жасау кезінде ластану әсерінің нәтижелері қабаттасады. Нәтижесінде, бір кездері қаланың жарқын келбеті бозарып, күңгірт болып, ғимараттар екі жақты көрініске ие болады, мұнда магистральдық көшеге қарайтын негізгі қасбет қара және сұр реңктерге ие, ал аула ашық реңктерге ие. Тағы бір маңызды мәселе-мұндай ғимараттардың жанында жаңа ғимараттар тұрғызу кезінде сәулет пен қоршаған ортаның үйлесімділігі бұзылады, бұл жердің жалпы көрнекі көрінісінде алшақтыққа әкеледі.

Айта кету керек, ғимараттардың қасбеттерін клинингті болмауы адамның психологиялық және эмоционалдық жағдайына жағымсыз әсер етіп қана қоймайды,

сонымен қатар объектінің тұтастығындағы ақаулар мен бұзылуларды жасырады. Тұрақты күтімнің болмауы нәтижесінде ғимараттың қараусыз қалған жағдайы байқалады.

Жоғарыда айтылғандарға қасбеттердің ластануы тұрғындардың психологиялық жағдайы мен әл-ауқатына, сондай-ақ аймақтағы жалпы эмоционалды атмосфераға айтарлықтай әсер етуі мүмкін екенін қосу керек. Ғимараттың қасбеттерін үнемі күтіп ұстау және таза ұстау тұрғындардың сенімсіздік сезімін және тіпті депрессияны арттыруы мүмкін. Ғимараттың жақсы күтілген келбетінің болмауы қоғамдық орындардағы қауіпсіздік сезімін төмендетеді, және ыңғайлы емес жерлерде болудан қорқу мен қорқыныш сезімін арттырады. Ғимараттың қасбетін үнемі тазалаудың болмауы адамның депрессиялық жағдайын күшейтетін қауіп пен алаңдаушылық сезімін тудыруы мүмкін. Қараңғы және ластанған қасбеттер көңіл-күйді тудырады және оқшаулану сезімін тудырады.

Ғимараттың эстетикалық келбетін сақтау қала құрылысы мен сәулет саласындағы маңызды аспект болып табылады. Ғимараттың эстетикасы қаланың немесе ауданның жалпы келбетін қалыптастыруда шешуші рөл атқарады, сонымен қатар тұрғындардың кеңістікті қабылдауына әсер етеді.

Ғимараттың эстетикалық келбетін сақтау мәселесі қазіргі кезеңде екі өзекті сұрақты шешуге байланысты – бұл әрлеу материалдарының тозуы мен ескіруі және үнемі маусымдық күтімнің болмауы. Ғимараттың эстетикалық келбетін сақтау шаралары тарихи ғимараттарды қайта құру мен қалпына келтіруді, ғимараттарды қоршаған ортаның зиянды факторларынан қорғау үшін жаңа технологиялар мен материалдарды қолдануды, сондай-ақ ғимарат иелерін ғимараттардың сыртқы түрі мен жағдайын сақтауға және жақсартуға ынталандыру бағдарламаларын қамтуы мүмкін.

Осылайша ғимараттың эстетикалық келбетін сақтау үшін келесі клининг шараларын қабылдау қажет:

1) ғимараттың қасбеттерін жаңарту -архитектураның, қасбеттердің, шатырдың және ғимараттың жеке элементтерінің түпнұсқа бөлшектерін қалпына келтіру;

2) нысанды үнемі маусымдық күтім жасау -құрылымның қасбеттерін үнемі эстетикалық және техникалық тексеру, әрлеу материалдарын тазалау және қалпына келтіру, терезелерді, есіктерді күту, сондай-ақ шатырға эстетикалық қызмет көрсету.

3) ғимараттардың тарихи және мәдени құндылықтарын қорғайтын, сондай-ақ олардың бұзылуына және қажетсіз жаңғыртылуына жол бермейтін нормативтік-реттеуші құжаттаманы өзгерту;

4) құрылыстың, тұрғын үй иелерінің бірлестігі және пәтер иелері кооперативі иелеріне ғимараттардың эстетикалық келбетін сақтау және жақсарту, тұрақты маусымдық күтімді ынталандыру үшін қаржылық және салықтық жеңілдіктер беру;

5) ғимараттардың эстетикалық келбетін сақтау мониторингі процесіне жұртшылықты тарту.

Бұл шараларды қолдану ғимараттардың эстетикалық келбетін сақтауға, тарихи мұраны сақтауға және қала тұрғындары үшін үйлесімді орта құруға көмектеседі.

Ғылыми нәтижелерді талқылау. Құрылымның эстетикалық келбеті қаладағы қоршаған ортаны қабылдау мәселесінде шешуші сәттер болып табылады. Бірақ ғимараттың әдемі көрінісін сақтау және сақтау жөніндегі іс-шаралардың көпшілігі қайта құруға байланысты, ал тарихи және мәдени маңызы бар ғимараттар мен нысандар осы рәсімге жатады. Осындай ерекше мәртебесі бар құрылымдар 2004 жылы Қазақстан Республикасының Үкіметі жариялаған «Мәдени мұра» мемлекеттік бағдарламасының назарына кіретінін атап өткен жөн («Мәдени мұра» мемлекеттік бағдарламасы, 2004). Бұл бағдарламаның негізгі мақсаты – елдің тарихи-мәдени мұрасын зерттеу, қалпына келтіру және сақтау. Бірақ, өкінішке орай, жаппай тұрғын үй, коммерциялық және қоғамдық ғимараттар күтім мен тазалау бағдарламаларына немесе іс-шараларына жатпайды.

Құрылымның эстетикалық жай – күйіне кешенді күтім нормативтік-реттеушілік құжаттарда нашар көрінеді және ғимаратты қайта құру кезінде жай ғана тармақтардың бірі болып табылады. Құрылымның эстетикалық жағдайын анықтаудың негізгі міндеттерінің бірі -визуалды тексеру. Сонымен, Д.Г. Золотозубов және М.А. Безгодов (Золотозубов и Безгодов, 2014) ғимараттың жай-күйін сыртқы белгілері бойынша алдынала бағалау кезінде көрінетін ақаулар мен зақымданулар анықталып, жазылатындығын, фотосуреттермен құрылымның жай-күйін сипаттайтындығын атап өтті. Эстетика мәселесінің маңыздылығы Е.Е. Громова және А.Р.Силантьева бұл ғимарат сәулетінің сыртқы түрінің маңыздылығын және олардың қалалық ортаның эстетикалық қасиеттеріне әсерін көрсетеді (Громова и Силантьева, 2015).

Айта кету керек, көп жағдайда ғимараттың эстетикалық мәселесі екінші орынға қойылады, ал қолда бар теориялық және практикалық зерттеулер техникалық сипаттағы мәселелерді шешеді – ғимарат пен құрылысты қайта құру.

Құрылымның эстетикалық жағдайына күтім жасау көбісінде бастамашыл іс-шара болып табылады. Мысалы, 2024 жылдың 22-28 сәуір аралығында Алматы қаласында Алматы қаласы әкімдігінің жалпы бақылауымен «Алматы - біздің ортақ үйіміз» науқаны аясында «Таза қасбеттер» акциясы өткізілді (Литер, 2024). Акция барысында ғимараттардың қасбеттерін тазалау, шыны терезелерді жуу және құрылымның қасбеттерінің эстетикалық жағдайын жақсарту бойынша көптеген жұмыстар жоспарланды. Өкінішке орай, бұл тұрақты жұмыс емес. «Алматы қаласының аумағын абаттандыру қағидаларының» 10-тарауының 148-тармағына сәйкес қарамағында ғимараттар мен құрылыстар орналасқан кәсіпорындар мен ұйымдардың басшылары, ғимараттар мен құрылыстардың иелері аталған объектілердің қасбеттерін және олардың жекелеген элементтерін (балкондар, лоджиялар, суағар құбырлары және т.б.) қалпына келтіру, жөндеу және сырлау жөніндегі жұмыстардың уақтылы жүргізілуін қамтамасыз етуі қажет екенін атап өту қажет. Сондай-ақ қасбеттерде орналасқан акпараттық тақтайшаларды таза және жарамды күйде ұстау, ескерткіш тақталар және осы іс-шаралар тұрақты негізде өткізілуі тиіс (Алматы қаласының аумағын абаттандыру ережесі, 2007). Айта кету керек, мұндай ережелер «жергілікті мемлекеттік басқару және өзін-өзі басқару туралы» Қазақстан Республикасының Заңына сәйкес бекітілген Қазақстанның барлық қалаларында бар.

Айта кету керек, қасбеттің жағымды эстетикалық келбетін сақтауда, ғимарат пен көше арасында орналасқан жасыл желек маңызды рөл атқарады. Шаң мен кірден табиғи қорғаныстың болмауына байланысты, нысандар мен құрылымдар 1-суретте байқалатындай тез ластанатынын атап өткен жөн. Мысалда келтірілген ғимарат Астана қаласындағы Ә. Молдағұлова мен Бейбітшілік көшелерінің қиылысында орналасқан.



1-сурет. Астана қаласы, Бейбітшілік к-сі, 73

Ескерту – авторлармен түсірілген (2024)

Қаланың көше желісін көгалдандыру нормалары Қазақстан Республикасының регламенттеуші құжаттарында жазылғаны белгілі, мұнда бір адамға шаққандағы аумақты көгалдандырудың орташа көрсеткіші 5-7 м²-ге тең болуы тиіс. Айта кету керек, бұл көрсеткішке ғимарат пен көше арасында болуы керек қорғаныс сипатындағы жасыл кеңістіктер де кіреді.

Төмендегі суретте ғимараттың қасбетін тазартудың оң әсерін байқауға болады (2-сурет). Эстетикалық тұрғыдан алғанда, құрылым сыртқы жағынан тартымды және жақсы күтімге ие болды, бұл әсіресе ғимараттың терезелерінде байқалады.

Әрине, қасбетті ластанудан тазартудың көптеген әдістері мен құралдары бар. Бірақ тұтастай алғанда, ғимараттың қасбетін тазалауды екі түрге бөлуге болады, біріншісі – қасбетті жеңіл ластанудан тазарту, екіншісі – қасбетті терең ластанудан тазарту. Өкінішке орай, қасбеттерді тазалаудың жүйесіз байланысты, көптеген ғимараттар үшін қасбетті тазарту айтарлықтай нәтиже бермейді. Арнайы құралдар мен жабдықтарды қолданғанның өзінде терең және ауыр ластануды тазарту қиын болады. Бұл жағдайда жеңіл косметикалық жөндеу жүргізу қажет. Сондай-ақ, қасбетті тазалаудың оң нәтижесіне жету үшін, қасбетті тазарту процедурасы тұрақты негізде жүргізілуі керек екенін атап өткен жөн.



2-сурет. Астана қаласы, Бейбітшілік к-сі, 73

Ескерту – авторлармен түсірілген (2024).

Ғимараттың қасбетінің эстетикалық жағдайы қазіргі сәулет өнерінің маңызды аспектілерінің бірі екені сөзсіз. Мысалы, В.В. Шеин өзінің «Кеңестік кезеңдегі қайта жаңартылатын өнеркәсіптік ғимараттардың қасбеттерінің көркемдік-эстетикалық келбетін қалыптастыру» деп аталатын еңбегінде өнеркәсіптік ғимараттарға қатысты маңыздылығын атап өткен жөн, ал бұл мәселе жаппай тұрғын үйлерде екі есе маңызды маңызды болып табылады (Шеин, 2019). Өкінішке орай, көптеген иелер, пәтер иелер кооперативі және мүлік иелерінің бірлестігі үшін ғимараттың қасбеттерін үнемі тазалау және жуу мәселесі маңызды емес. Бірақ, әртүрлі маркет – плейстерде қасбеттерді жуу бойынша ұсыныстар бар екенін атап өткен жөн. Бұл сұранысты ірі бизнес орталықтар, сауда – ойын-сауық кешендері және қаланың магистральдық көшелерінің бірінші қатарында орналасқан басқа да көптеген нысандар тудырады. Бұл тенденция ғимараттардың қасбеттерін тазалаудың маңыздылығын көрсетеді, ал тұрғын үйлердің, шағын және орта қабатты ғимараттардың қасбеттерінің клинингі қажеттілігі бұрыннан бар.

Қазіргі кезеңде ғимараттардың қасбеттерін жуу қалалық ортаға қызмет көрсетудің маңызды элементі болып табылады, бұл ғимараттардың сыртқы түріне де, беріктігіне де әсер етеді.

Әлемдік тәжірибеде қасбеттерді жуу жиі кездеседі. Мегалолистерде қасбеттер жылына 1-2 рет жуылады, әсіресе тарихи аудандардағы ғимараттар. Мысалы Нью-Йорк және Торонто сияқты қалаларда қоғамдық және тұрғын үйлерге арналған тұрақты жуу 6-12 айда бір рет құрайды.

Астындағы келтірілген мысалда тұрғын үйдің қасбетін жуудың оң нәтижелері айқын көрінеді. Бұл тұрғын үй Нью-Йорк қаласында. Манхэттен ауданында орналасқан (3-сурет).



3-сурет. АҚШ, Нью-Йорк қаласы, Манхэттен

Ескерту – сурет pikabu.ru сайттан алынған

Ылғалды климат пен халықтың тығыздығы жоғары болған жағдайда – үнемі жуу қажет, әсіресе шыны қасбеттер үшін. Қазіргі заманда ең көп таралған тәсіл – ол өнеркәсіптік альпинистерді тарта отырып колмен жуу әдісі болып табылады, әсіресе ғимараттың сәулеті мәдени маңызы бар болғанда немесе қаланың тарихи қалыптасқан бөлігінде орналасқан кезде.

Қазіргі кезеңде ғимараттардың қасбеттерін таза ұстау бірқатар әлеуметтік, экологиялық, техникалық және эстетикалық факторларға байланысты. Сонымен қатар, бірқатар елдер мен аймақтарда қасбеттерді таза ұстау бойынша экологиялық нормалар бар екенін атап өткен жөн (4-сурет).



4-сурет. Франция, Париж қаласы

Ескерту – сурет dreamstime.com сайтынан алынған

Қасбеттерді жуу – бұл эстетикалық процедура ғана емес, сонымен қатар олардың сыртқы түріне тікелей әсер ететін ғимараттарды күтіп ұстаудың маңызды бөлігі. Урбанизацияның өсуі, экологиялық талаптардың қатаюы және қалалық орта стандарттарының жоғарылауы жағдайында қасбеттерді үнемі тазарту өзекті қажеттілікке айналады. Заманауи технологиялар жууды қауіпсіз, тиімді және тұрақты даму принциптерін ескере отырып орындауға мүмкіндік береді. Қасбеттік тазалауды жүйелі түрде енгізу – бұл нысанның беріктігіне, оның имиджіне және пайдаланушылар үшін қолайлы ортаға салынған инвестиция.

Қорытынды. Ғимараттардың қасбетінің клинингі – бұл эстетикалық жағымды көрініс ғана емес, сонымен қатар қоршаған ортаға қамқорлықтың белгісі. Ғимараттың көрнекі таза қасбетінің нәтижесі – эстетикалық балғындық, жақсы күтімді және тартымды көрініс, бұл қонақтар мен қала тұрғындарының әсерін жақсартады.

Ғимараттың қасбеттерін үнемі тазарту ғимараттың айналасындағы ауадағы шаң мен ластануды азайтуға көмектеседі, бұл халықтың денсаулығы мен әл-ауқаты үшін маңызды. Клинингтің келесі оң нәтижесі құрылымның қызмет ету мерзімін ұзарту болып табылады, өйткені таза қасбет ғимарат бетінің зақымдалуына және материалдардың құрылымына жол бермейді.

Айта кету керек, ғимараттардың таза қасбеттері коммерциялық тартымдылықты жақсартады, өйткені таза қасбет клиенттер мен жалға алушыларды тартудың негізгі факторы болып табылады. Қала ауқымында тұрақты тазалау тұрғындардың жайлылығы мен өмір сүру сапасын арттыруға ықпал ететін қолайлы қалалық орта жасайды.

Ғимараттың жақсы эстетикалық жағдайы қалалық ортаның жайлы және қонақжай атмосферасын құра алады, сонымен қатар тұрғындардың көңіл-күйін көтереді. Құрылымның жағымды көрінісі тұрғындардың әлеуметтік белсенділігінде маңызды рөл атқарады, өйткені олар кешке көшеде өздерін жайлы әрі қауіпсіз сезінеді.

Жалпы, тазартылған қасбеттер ғимаратқа балғын және тартымды көрініс береді, оның айналасында қолайлы атмосфера жасайды, ауданның жалпы депрессиясы мен қылмыс деңгейін төмендетеді, адамның психологиялық және эмоционалдық жағдайын жақсартады.

Бұл факторлар тұрғындардың психологиялық және эмоционалдық әл-ауқатын жақсарту үшін тұрақты тазалау шараларын қамтамасыз етудің қаншалықты маңызды екенін көрсетеді. Қоғамдық ұйымдар мен қала барлық тұрғындар үшін қауіпсіз, жайлы және жағымды сәулеттік және қалалық ортаны құру үшін ғимараттардың қасбеттерін тазалауды жүйелеу жұмыстарын жүргізуі керек.

Әдебиеттер тізімі

- «Сәулет, қала құрылысы және құрылыс қызметі туралы» Қазақстан Республикасының Заңы (2001). Әділет. Қазақстан Республикасы нормативтік құқықтық актілерінің ақпараттық-құқықтық жүйесі, <https://adilet.zan.kz/rus/docs/Z010000242> ;
- «Мәдени мұра» мемлекеттік бағдарламасы (2004). Әділет. Қазақстан Республикасы нормативтік құқықтық актілерінің ақпараттық-құқықтық жүйесі, <https://adilet.zan.kz/rus/docs/U040001277> ;
- Золотозубов Д.Г., Безгоднов М.А. (2014). Реконструкция зданий и сооружений. – Пермь: Издательство: Перм.нац.исслед.политехн.ун-та, 2014. – 159. // Zolotozubov D.G., Bezgodov M.A. (2014). Rekonstrukciya zdaniy i sooruzhenij. – Perm': Izdatel'stvo: Perm.nac.issled.politekh.un-ta, 2014. – 159;
- Громова Е.Е., Силантьева А.Р. (2015). Архитектурный облик зданий и сооружений как важный компонент в городском строительстве. Материалы VII Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» // Gromova E.E., Silant'eva A.R. (2015). Arhitekturnyj oblik zdaniy i sooruzhenij kak vazhnyj komponent v gorodskom stroitel'stve. Materialy VII

- Mezhdunarodnoj studencheskoj nauchnoj konferencii «Studencheskij nauchnyj forum» URL: <https://scienceforum.ru/2015/article/2015017468> ;
- «Таза қасбеттер» акциясы, (2024). «Литер» газеттің материалы - <https://liter.kz/v-almaty-otmoiut-fasady-i-vitriny-1713786780/> ;
- Алматы қаласының аумағын абаттандыру ережесі, (2007). Әділет. Қазақстан Республикасы нормативтік құқықтық актілерінің ақпараттық-құқықтық жүйесі, https://adilet.zan.kz/rus/-docs/V07R000767_ ;
- Шейн В.В. (2019). Формирование художественно-эстетического облика фасадов реконструируемых промышленных зданий советского периода. Инженерный вестник Дона, №1. // SHein V.V. (2019). Formirovanie hudozhestvenno-esteticheskogo oblika fasadov rekonstruiруemyh promyshlennyh zdaniy sovetskogo perioda. Inzhenernyj vestnik Dona, №1. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/issue/136?page=6> ;
- Шагин А.Л., Гончаренко Д.Ф., Бондаренко Ю.В., Гончаров В.Б. (1991). Реконструкция зданий и сооружений. – М.: Высшая школа, – 352. // SHagin A.L., Goncharenko D.F., Bondarenko YU.V., Goncharov V.B. (1991). Rekonstrukciya zdaniy i sooruzhenij. – М.: Vysshaya shkola, – 352;
- Асаул А.Н., Казаков Ю.Н., Ипанов В.И. (2005). Реконструкция и реставрация объектов недвижимости. – Санкт-Петербург. Издательство: Гуманистика. – 288. // Asaul A.N., Kazakov YU.N., Ipanov V.I. (2005). Rekonstrukciya i restavraciya ob"ektov nedvizhimosti. – Sankt-Peterburg. Izdatel'stvo: Gumanistika. – 288;
- Кочерженко В.В., Лебедев В.М. (2007). Технология реконструкции зданий и сооружений. – М.: Ассоциация строительных вузов. – 224. // Kocherzhenko V.V., Lebedev V.M. (2007). Tekhnologiya rekonstrukcii zdaniy i sooruzhenij. – М.: Associaciya stroitel'vyh vuzov. – 224;
- Иконников А.В. (1972). Архитектура города. Эстетические проблемы композиции. – М.: Стройиздат. – 216. // Ikonnikov A.V. (1972). Arhitektura goroda. Esteticheskie problemy kompozicii. – М.: Strojizdat. – 216;
- Ахмедова Е.А. (2007). Эстетика архитектуры и дизайна. – Самара. Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – 432. // Ahmedova E.A. (2007). Estetika arhitektury i dizajna. – Samara. Samarskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet. – 432;
- Забельшанский Г.Б., Минервин Г.Б., Раппапорт А.Г., Сомов Г.Ю. (1985). Архитектура и эмоциональный мир человека. – М.: Стройиздат. – 208. // Zabel'shanskij G.B., Minervin G.B., Rappaport A.G., Somov G.YU. (1985). Arhitektura i emocional'nyj mir cheloveka. – М.: Strojizdat. – 208;
- Хасиева С.А. (2001). Архитектура городской среды. – М.: Стройиздат. – 200. // Hasieva S.A. (2001). Arhitektura gorodskoj sredy. – М.: Strojizdat. – 200;
- Шепелев Н.П., Шумилов М.С. (2000). Реконструкция городской застройки. – М.: Высшая школа. – 271 // SHepelev N.P., SHumilov M.S. (2000). Rekonstrukciya gorodskoj zastrojki. – М.: Vysshaya shkola. – 271.

Information about authors

Kaidarov Ansar Shalkaruly – 2 nd year doctoral student EP 8D07301 – «Archutecture», S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Zhenis avenue, 62, 010011, Astana, Kazakhstan, E-mail: norach_98@mail.ru

Karabayev Gani – PhD, Acting Associate Professor, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Zhenis avenue, 62, 010011, Astana, Kazakhstan, E-mail: karabaew88@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6418-2988>, 8 776 713 64 95

Mamedov Seimur – PhD, Associate Professor of Practice, L.N.Gumilyov Eurasian National University, Satbaev st., 2, 10000, Astana, Kazakhstan, E-mail: sp_proekt_stroy@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2850-8100>

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CIVIL ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_235
IRSTI 67.11.29

M. Nurgozhina¹, B. Abdrakhmanova¹, D-W. Chang², A. Omarov¹, I. Zhumadilov³

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

E-mail: malika_nur@list.ru

E-mail: milanbi@mail.ru

²Tamkang University, Taipei, Taiwan

E-mail: dwchang@tku.edu.tw

E-mail: omarov_01@bk.ru

³Shakarim University, Semey, Kazakhstan

E-mail: f001.kz@gmail.com*

COMPARATIVE ANALYSIS OF NUMERICAL MODELING AND STATIC PILE LOAD TEST RESULTS FOR CFA PILES

СФА ҚАДАЛАРЫН САНДЫҚ МОДЕЛЬДЕУ НӘТИЖЕЛЕРІН ЖӘНЕ СТАТИКАЛЫҚ СЫНАУ ЖҮКТЕМЕЛЕРІМЕН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ИСПЫТАНИЙ СВАЙ СФА

Abstract. The goal of this paper is a comparative assessment of results obtained from the field static pile load test and simulated numerical analysis. Plaxis 3D Foundation software was used to simulate the field static pile test for numerical analysis. Results of this study demonstrate the comparison of load-settlement curves obtained from field static pile test and numerical analysis of CFA pile. As a result of field static pile load test, the bearing capacity of the pile was determined. Moreover, results of residual settlement after unloading in case of the field test and numerical analysis were demonstrated. As a result of the load-settlement curve, numerical analysis with Plaxis 3D software is applicable for pile design with sufficient accuracy. The study emphasizes the importance of validating CFA pile behavior through both empirical and computational approaches in challenging geotechnical conditions. This dual-method approach helps improve the accuracy of pile foundation design and ensures better reliability of structural performance. The correlation between measured and simulated results allows engineers to verify modeling assumptions and boundary conditions. Additionally, this approach offers a cost-effective solution in large-scale construction projects where field testing every pile is impractical. Ultimately, the integration of field testing with advanced numerical modeling supports optimization in foundation engineering and contributes to safer and more efficient construction practices.

Keywords: static pile load test, CFA, load-settlement curve, numerical analysis, Plaxis.

Аңдатпа. Бұл мақаланың мақсаты – статикалық қадаларды далалық сынау және имитациялық сандық талдау нәтижесінде алынған мәліметтердің салыстырмалы бағасын беру. Plaxis 3D Foundation бағдарламалық жасақтамасы сандық талдау үшін далалық статикалық сынауды модельдеуге қолданылды. Зерттеу нәтижелері СФА қадалары үшін алынған жүктеме-отырығу қисықтарын далалық және сандық әдістермен салыстыруды көрсетеді. Далалық статикалық сынақ нәтижесінде қаданың жүк көтергіштігі анықталды. Сонымен қатар, жүктемені түсіргеннен кейін қалдық отыру шамалары сандық және далалық әдістермен салыстырылды. Бұл қисықтарды сараптау Plaxis 3D бағдарламалық қамтамасымен жүргізілген талдаудың қадаларды жобалауға жеткілікті дәл екенін көрсетеді. Бұл зерттеу күрделі топырақ жағдайында СФА технологиясының сенімділігін тексерудің маңыздылығын көрсетеді. Эмпирикалық және модельдік әдістерді біріктіру инженерлік шешімдердің дәлдігін арттырады. Модельдеу мен шынайы өлшеу нәтижелерінің сәйкестігі инженерлерге бастапқы шарттар мен жүктеме өсерлерін дұрыс орнатуға мүмкіндік береді. Бұл әдіс ірі құрылыстарда уақыт пен ресурстарды үнемдейді. Далалық сынақ пен сандық модельдеуді үйлестіру құрылыс іргетастарының сенімділігі мен тиімділігін арттыруға ықпал етеді.

Түйін сөздер: статикалық қада жүктемесін сынау, CFA, жүктемені реттеу қисығы, сандық талдау, Плакис жүйесі, инженерлік-геологиялық түсірістер, арнайы геотехникалық карталар.

Аннотация Целью данной статьи является сравнительная оценка результатов, полученных в результате проведения полевого статического испытания сваи и численного моделирования. Программное обеспечение Plaxis 3D Foundation использовалось для моделирования полевого испытания с целью проведения численного анализа. Результаты исследования демонстрируют сравнение кривых осадок под нагрузкой, полученных в полевых условиях и в результате численного анализа CFA-сваи. В ходе испытания была определена несущая способность сваи, а также проанализированы остаточные осадки после разгрузки по обоим методам. Полученные результаты подтверждают, что численное моделирование с использованием Plaxis 3D может быть эффективно применено для проектирования свай с достаточной точностью. Работа подчёркивает значимость комплексного подхода, объединяющего экспериментальные и цифровые методы анализа свайных фундаментов в сложных инженерно-геологических условиях. Сопоставление результатов способствует повышению достоверности расчётов и позволяет более точно интерпретировать поведение свай под нагрузкой. Кроме того, такой подход экономически эффективен при массовом строительстве, когда проведение испытаний каждой сваи невозможно. Интеграция полевых и численных методов позволяет оптимизировать проектные решения и повысить надёжность и безопасность строительных объектов.

Ключевые слова: статическое испытание сваи на нагрузку, CFA, кривое распределение нагрузки, численный анализ, Plaxis.

Introduction. Pile foundations are critical to ensuring the stability and longevity of construction projects, especially for multi-story buildings on challenging engineering and geological soils. Determining the bearing capacity of piles and their load response with precision is essential for both safety and cost optimization.

CFA piles are a type of cast-in-place pile constructed in a single continuous cycle. The technology, illustrated in Figure 1, involves advancing a hollow-stem auger to the required depth, during which the soil retained on the auger flights provides lateral support to the borehole walls. As the auger is withdrawn, concrete is pumped through the hollow stem under pressure, maintaining the stability of the surrounding soil through positive concrete pressure. Immediately after completing the concreting process, reinforcement is inserted into the fresh concrete, providing additional structural strength.

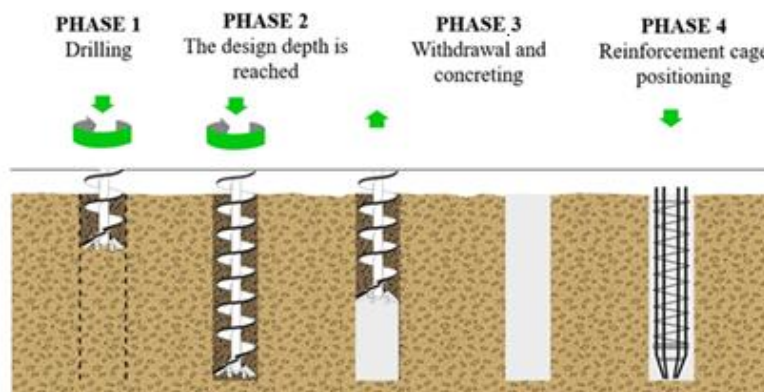


Figure 1. Sequence of CFA pile installation

Note – compiled by the author

However, when using such innovative methods, especially in the absence of experience or data for similar geological conditions, static pile testing becomes a mandatory step for quality control (Brinch, 1970; Chin, 1970; Meyer, Siemaszko, 2019). These tests help confirm the reliability of the applied technology and ensure that the piles meet the design specifications.

Eurocode EC7-1 (Section 7.5) (British Standards Institution, 2004) outlines several scenarios in which pile testing is considered necessary, including the use of new methods or the lack of sufficient theoretical foundation. The works of Bergado (Bergado et al, 1996) and Farouk (Farouk, Shahien, 2013) indicate that the behavior of piles in such conditions can differ significantly from theoretical calculations, particularly when high groundwater levels are present.

The experience of countries with rapidly developing construction markets, such as the UAE, also underscores the importance of using CFA technology (Farid, 2023). According to local regulations, 5% of piles are randomly tested, and an integrity test is performed on all piles (The Code Handbook, 2013). Static tests, in which the load is increased to 1.5-2 times the design load, allow for the evaluation of pile behavior under load and help prevent costly mistakes.

For the construction of a multi-story building in Al-Arasaat district, Baghdad province, a decision was made to conduct tests on a working CFA pile to confirm its design parameters. Research shows that CFA piles have several advantages, including high installation speed and reduced vibrational impact on the surrounding environment (Shah, Deng, 2020; Fetherston et al., 2019); however, their behavior under load requires detailed analysis. According to the works of De Beer (DeBeer, 1968) and Fellenius (Fellenius, 1968), these approaches have proven to be reliable tools for evaluating ultimate axial load and interpreting the load-settlement curve.

Considering the above aspects, conducting static pile tests with the CFA method in complex soil conditions requires the use of reliable methods for assessing their bearing capacity. Both conventional field static test and modern numerical analysis methods, which have proven effective in engineering practice, were applied.

2 Methods. 2.1 Field static pile load test Field static pile load test. Continuous Flight Auger (CFA) technology was chosen to improve the properties of soft soils. This method involves rotating a hollow auger with a diameter of 600 mm to a depth of 18 m, during which concrete of grade C25/30 is pumped through the auger under constant positive pressure. The concrete pouring helps strengthen the soil as it hardens. When extracting the auger, vertical pressure is applied to the soil, while horizontal pressure is exerted on the surrounding soils, thereby improving their physical and mechanical properties. Therefore, the pile installation process not only strengthens the soil but also creates a solid foundation for further testing and evaluation of the pile's bearing capacity.

Tested CFA pile PCFA54 is one of the piles of a piled raft foundation of the planned 18 floors building and placement of the analyzed pile is shown in Figure 2.



Figure 2. Testing pile PCFA54 installed with CFA method

Note – compiled by the author

The next important stage of the study is the assessment of the pile's bearing capacity, which is carried out through static load testing (SLT). After the piles were installed using the CFA technology, it is necessary to confirm their calculated capacity to withstand load in real operating conditions. The field static pile load test was carried out on 18-19 April, 2022. The working load for each pile is 150 tons, while the maximum test load is 225 tons. The tests were conducted in two loading cycles, each consisting of several steps with progressively increasing load. These cycles help model various operating conditions for the piles, aiding in the precise evaluation of their behavior under different load values and interaction with the soil. A detailed description of the loading cycles and corresponding stages is provided in Table 1.

Table 1. Loading Cycles and Parameters
for Static Load Testing (SLT)

Cycle	Load cycle (%)	Load value (tons)	Minimum load holding time	Accumulated time (min)
1	0	0	0	0
	25%	37.5	30 min	30
	50%	75	30 min	60
	75%	112.5	30 min	90
	100%	150	1 hour	150
	75%	112.5	10 min	160
	50%	75	10 min	170
	25%	37.5	10 min	180
	0	0	1 hour	240
2	100%	150	6 hour	600
	125%	187.5	1 hour	660
	150%	225	6 hour	1020
	125%	187.5	10 min	1030
	100%	150	10 min	1040
	75%	112.5	10 min	1050
	50%	75	10 min	1060
	25%	37.5	10 min	1070
	0	0	1 hour	1130=18 h 50 min

Note – compiled by the author

To ensure the accuracy and stability of the tests, the Kent ledge reaction system is used. This high-tech system was chosen for its reliability and its ability to minimize external influences, such as vibration or soil displacement. A detailed schematic representation of the static pile load test is provided in Figure 3, which illustrates the setup and configuration of the system. The reaction system includes piles installed at least 2 meters below the base of the test pile to minimize errors during testing. The spacing between the centers of the reaction piles must be at least 3 meters, equivalent to four times the diameter of the test pile, in compliance with Eurocode EC7-1 and British standards. This spacing ensures no interaction between the piles, thereby maintaining the accuracy of the results.

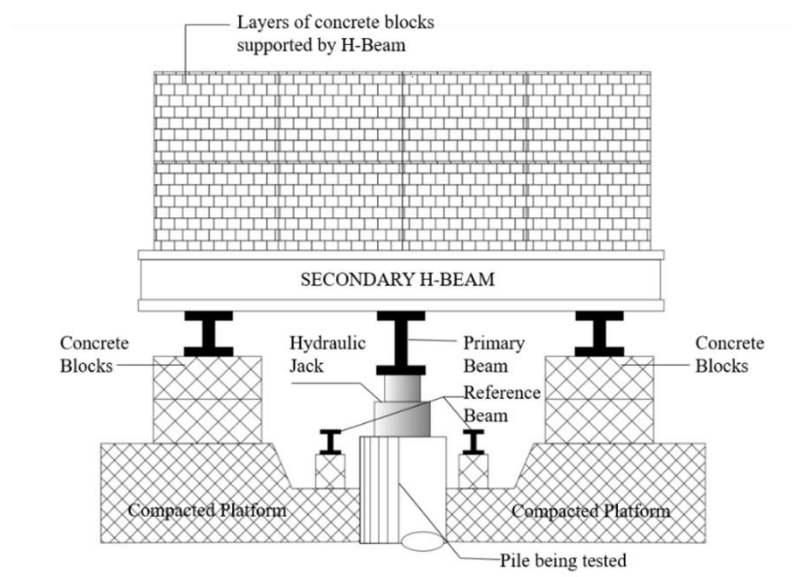


Figure 3. Static pile load test

Note – compiled by the author

For the accuracy of measurements during the tests, calibrated and certified manometers are also used, as well as dial gauges to determine the pile settlement. These devices record changes in load and settlement in real-time, allowing the pile behavior to be closely monitored. The testing was executed using hydraulic jack, pressure gauge of 600 bars and two dial gauges in accordance with B.S. Standard Test Methods for “Deep Foundations under Static Axial Compressive Load” and were shown in Figure 4. A continuous recording of the pile head displacement in every addition or lifting of load within the specified time period was recorded.



Figure 4. Dial gauges' readings during 150 Tons load test

Note – compiled by the author

2.2 Numerical analysis with Plaxis 3D Foundation software. The numerical analyses were conducted using the commercial software Plaxis 3D Foundation. The software allows to use advanced constitutive models. The Mohr-Coulomb material model was used in this analyses for soil layers and data used for soil properties was taken from the results of geological survey. Soil parameters such as Young's modulus (E), Poisson's ratio (ν), cohesion (c), internal friction angle (ϕ), and dilatancy angle (ψ) were required for this model and given in table 2. The model

boundaries of the research area were 30 m in a horizontal and 30 m in a vertical direction and the geological conditions of the tested area are demonstrated in Figure 6. The upper layer of Silty Clay with a thickness of 9.25 m followed by 16.25 m of Silty Sand. A thin layer of Silty Clay with thickness of 4.5 m is located 25.5 m below the surface. A groundwater level was determined at 4 m below the surface.

The CFA pile was modeled using the Linear Elastic (LE) material model. The body of the CFA pile was modeled as a cluster with the dimensions of the radius and pile length of 0.6m and 18m, respectively. On top of the pile a distributed load of 225 tons was placed. Considering the recommendations of the Plaxis manual, the extended interface was modeled below the pile's base (Holko, Stacho, 2014). Initial geological conditions and CFA pile creation were simulated in the first construction stage and second stage, respectively.

3. Results and Discussions. 3.1 Field static pile load test. Static pile load test was carried out in the period of April 18 through April 19, 2022 after 24 days of casting piles. Bored pile with length of 18 m and 600 mm diameter installed by CFA method. In order to assess static pile load test results pile bearing capacity is determined from pile-head load-settlement curve. These data were collected during the field test on pile PCFA 54 (shown in Figure 3) included strains and top load. Figure 5 demonstrates static loading test results of pile-head load plotted against the pile settlement.

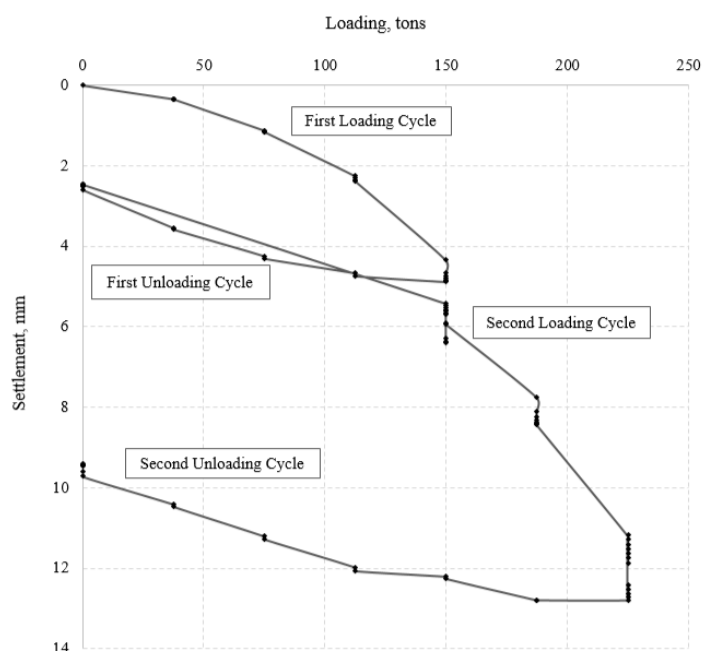


Figure 5. Pile-head load-settlement curve for pile PCFA 54r

Note - compiled by the author

The total settlement in first cycle was 4.88 mm under 150 tons, which is working load, while the final residual of settlement for first cycle was 2.46 mm which is equal to 50% of total settlement. The total settlement was 12.79 mm under 225 tons load equal to 150 % of the working load in second cycle, while the final residual of settlement for second cycle was 9.40 mm, which is more than 50% of total settlement equal to 73 %.

As stated in the standards of Federation of Piling Specialists in British Standards, bearing capacity of the pile is accepted as pile toe resistance at the settlement of 10% of pile diameter

(Shanz et al., 1999). The tested pile did not show in all stages of test any unnatural behavior up to applying of loads 225 tons with average total settlement was 12.79 mm, which is within the permissible limits of settlement. Consequently, the results indicate that total settlement of 12.79 mm represents approximately 2.13 % of pile diameter, which is less than 10% threshold, falling within the standard limits.

Since the total settlement in 100% of the adopted design load is equal to 150 Tons not more than 10 mm $> 4.88 \div 5.93$ mm in two cycles, and then it is accepted by the criteria of standards. Consequently, this tested pile No. PCFA- 54 with 600 mm diameter is adequate to design load equal to 150 Tons.

3.2 Numerical analysis with Plaxis 3D Foundation software. The numerical analysis was performed in order to understand the results of real field static pile load test data and to improve the results interpretation of the pile load test. Geotechnical model of pile and geology of the area of interest is shown in Figure 6.

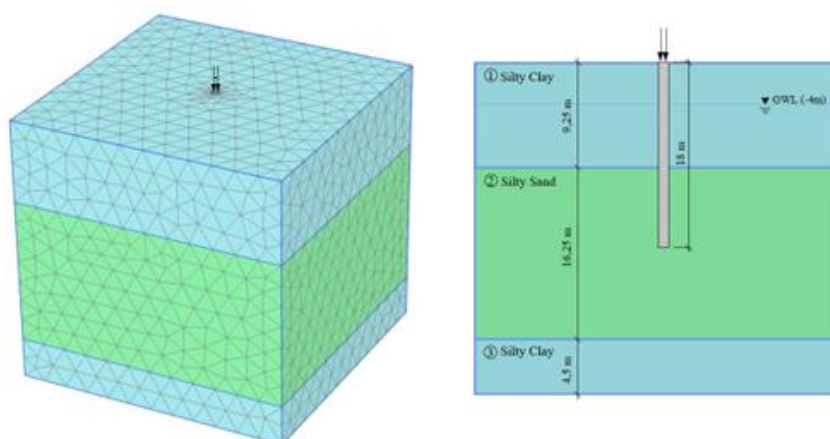


Figure 6. Numerical model of the analyzed CFA pile: overall view and profile of the model

Note – compiled by the author

Linear elastic non-porous model with following properties was chosen for concrete pile material: unit weight 24 kN/m³, reference modulus of elasticity $E_{ref}=30\text{GPa}$ and Poisson's ratio $\nu=0.2$. Basic soil properties of geological conditions are demonstrated in Table 2.

Table 2. Basic soil properties for numerical model

Name	Soil type 1	Soil type 2	Soil type 3	Pile (Concrete)
Symbol	Silty Clay	Silty Sand	Silty Clay	-
Depth (m)	9.25	25.50	30.00	18.00
Thickness (m)	9.25	16.25	4.5	18.00
γ (kN/m ³)	19.50	24	19.50	24.00
γ_{sat} (kN/m ³)	21.00	25	21.00	-
ϕ'	22	35	22	-
c'	23	19	23	-
E	20000	75800	20000	$30 \cdot 10^6$
ν	0.3	0.4	0.3	0.2

Note – compiled by the author

The results of the Plaxis 3D software numerical analysis were presented in Figures 7-8 in terms of total principal stress and total displacement. According to the previous studies, the groundwater level was modeled 4m below the surface using a generated phreatic level in numerical modeling (Hyodo et al., 2020). The groundwater was modelled regarding to the actual engineering-geological conditions of the tested area. Maximum value of total principal stress was equal to $0.01066 \cdot 10^{-12}$ kN/m² on element number of 1307 at Stress point 5227, while minimum value was equal to 5236 kN/m² on element 4410 at stress point 17640. Maximum value of total displacement (u) at 150 Ton was equal to 5.456 mm.

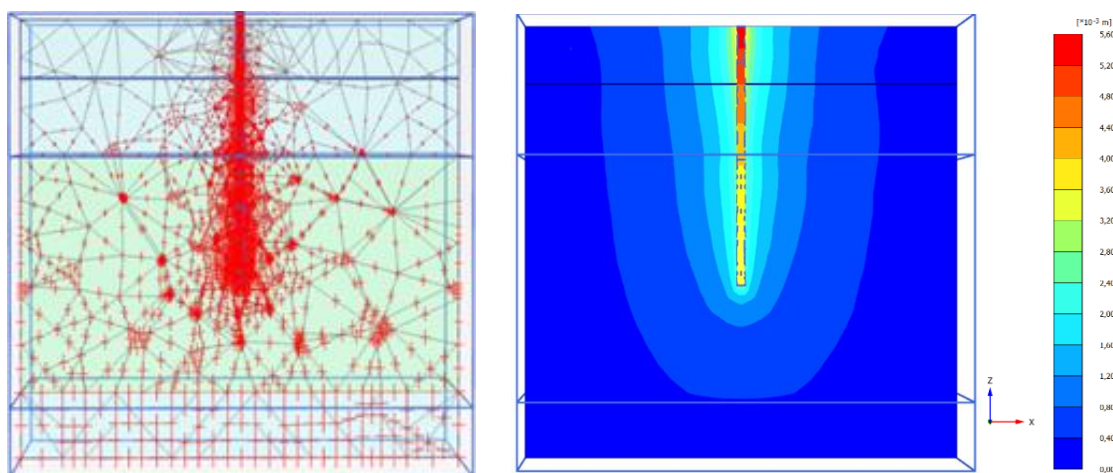


Figure 7. Total principal stress and total displacement at 150 Ton

Note – compiled by the author

Maximum value of total principal stress was equal to 260,3 kN/m² on element number of 4495 at Stress point 17980, while minimum value was equal to -7855 kN/m² on element 4410 at stress point 17640. Maximum value of total displacement (u) at 225 Ton was equal to 15.22 mm.

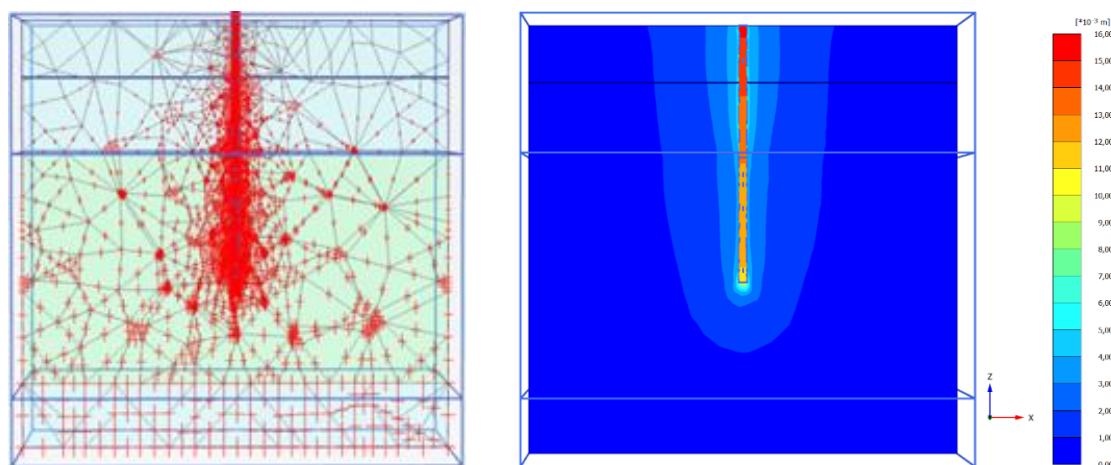


Figure 8. Total principal stress and total displacement at 150 Ton

Note – compiled by the author

Results of actual field static pile test and numerical analysis were compared and demonstrated in the load-settlement curve in Figure 9.

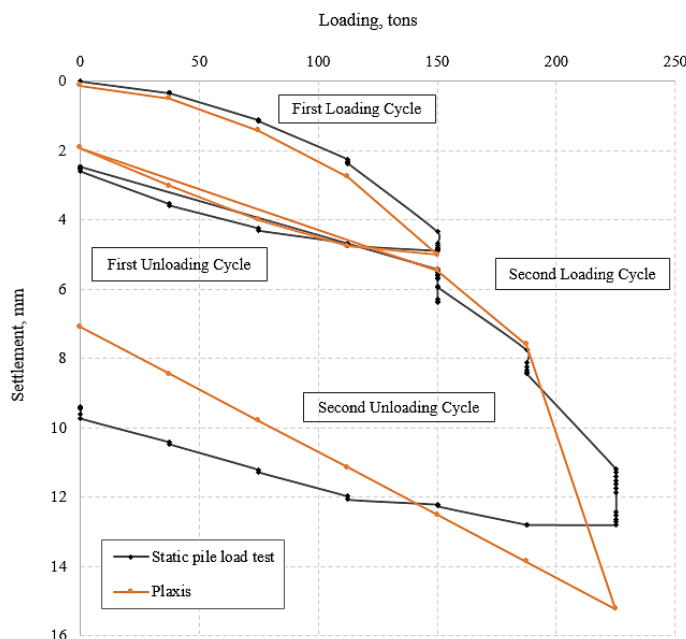


Figure 9. Compared load-settlement curve obtained from results of field static pile test and numerical analysis

Note – compiled by the author

Conclusion. Conventional bored pile and CFA piles are commonly used worldwide. The CFA technology shows effectiveness in terms of time, cost and noise management. In this paper, the authors aim to assess if the findings obtained from field static test correspond with conclusions derived from numerical analysis. The numerical analysis was conducted by simulating field static pile test in Plaxis 3D Foundation software according to finite element method.

Results of this study demonstrates comparison of load-settlement curves obtained from field static pile test and numerical analysis of CFA pile. As a result of field static pile load test, bearing capacity of the pile was determined as pile toe resistance at the settlement of 12.79 mm which is less than 10% of pile diameter, while settlement results obtained from numerical analysis at 225 tons was equal to 15.22 mm, which is less than 10% of pile diameter as well. Even though results of residual settlement after unloading in case of the numerical analysis demonstrated less value than the settlement obtained from field test due to modeling assumptions of Plaxis, the results of the compared load-settlement curve show that numerical analysis with Plaxis 3D software is applicable for pile design with sufficient accuracy.

References

- Brinch Hansen, J. (1970). A revised and extended formula for bearing capacity. Danish Geotechnical Institute, Bull, Copenhagen. 222-226
- Chin, F. K. (1970). Estimation of ultimate load of piles not carried to failure. Proceedings 2nd Southeast Asia Conference on Soil Engineering, 81–92.
- Meyer, Z., and P. Siemaszko. (2019). Static load test analysis based on soil field investigations. Bull. Pol. Acad. Sci.: Tech Sci. 67(2), 329–337.

- British Standards Institution (2004). EN 1997-1:2004. Eurocode 7: Geotechnical Design – Part 1: General Rules. Code of Practice. BSI, London.
- Bergado D., Anderson R., Miura N., and Balasubramaniam A., (1996). Soft ground improvement in lowland and other environments, ASCE Press, USA, 186-232.
- Farouk A., and Shahien M., (2013). Ground improvement using soil–cement columns: Experimental investigation, Alexandria Engineering Journal, Vol. 52, Issue 4, 733-740.
- Farid Ibrahim, Abdelkareem Alzo'ubi, Hamad Odhabi, (2023). A Generalized Regression Neural Network Model to Predict CFA Piles Performance Using Borehole and Static Load Test Data, Arabian Journal for Science and Engineering, 4403-4419.
- The Code Handbook (2013). Abu Dhabi International Building Codes, Department of Municipal Affairs, Abu Dhabi, UAE.
- Shah, F.R. and Deng, L. (2016). Comparing Axial Behaviour of Non Displacement and Displacement Piles using Field Load Tests, 69th CGS Conference Vancouver, B.C. Canada
- Shah F., and Gursaud N., (2020). The application and development of Continuous Flight Auger (CFA) piles in the Prairies, Geo-Virtual conference Resilience and Innovation, Canada.
- Fetherston J., Flynn R. and Chong W., (2019). Lateral soil displacement resulting from the installation of CFA piles in soft marine clays, 13th Australia Zealand conference on Geomechanics, Acosta-Marinez and Lehane (Rds.), Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia, 427-432
- DeBeer E. E. (1968). Proefondervindlijke bijdrage tot de studie van het grensdrag vermogen van zand onder funderingen op staal. Tijdschrift der Openbar Verken van België, No. 6, 1967 and No. 4, 5, and 6.
- Fellenius B. H. (2001). What capacity value to choose from the results a static loading test. We have determined the capacity, then what?, Two articles reprinted from Deep Foundation Institute, Fulcrum, Winter 2001, 19-22
- Holko M., Stacho J. (2014). Comparison of numerical analyses with a static load test of a continuous flight auger pile, Slovak Journal of Civil Engineering, Vol. 22, No. 4, 1-10, <https://doi.org/10.2478/sjce-2014-0017>.
- Shanz, T., Vermeer P.A., Bonnier P.G. (1999). The hardening soil model: Foundation and verification. Beyond 2000 in computational Geotechnics – 10 years of Plaxis, Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5809-040-X.
- Hyodo J., Tamari Y., Sone A., Ozutsumi O., Ichii K. (2020). A simplified method to consider the pile of insufficient length to obtain the support from bearing stratum, Journal of Asian architecture and building engineering, <https://doi.org/10.1080/13467581.2020.1764847>.
- Krasiński A., Wiszniewski M. (2017). Static load test on instrumented pile – field data and numerical simulations, Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. 39, No. 3, <https://doi.org/10.1515/sgem-2017-0026>.

Information about authors

Iliyas Zhumadilov – PhD, Shakarim University, Semey, Kazakhstan, E-mail: f001.kz@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8933-3332, +7 707 659 49 61

Malika Nurgozhina – PhD student, Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, malika_nur@list.ru

Bibigul Abdrakhmanova – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, milanbi@mail.ru

Der-Wen Chang – PhD, Professor, Tamkang University, Taipei, Taiwan, dwchang@mail.tku.edu.tw

Abdulla Omarov – PhD, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, omarov_01@bk.ru

СӘУЛЕТ
АРХИТЕКТУРА
ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_245
MPHTI 67.07.01

Д.Е. Сарсембаева

Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

E-mail: dinara5431@mail.ru*

КРУПНЫЕ ТОРГОВЫЕ ОБЪЕКТЫ СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ В СТРУКТУРЕ ГОРОДА АСТАНЫ

АСТАНА ҚАЛАСЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫНДАҒЫ ӘЛЕУМЕТТІК ИНФРАҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ІРІ САУДА НЫСАНДАРЫ

LARGE SOCIAL INFRASTRUCTURE RETAIL FACILITIES IN THE STRUCTURE OF ASTANA CITY

Аннотация. В данной статье рассмотрены перспективы дальнейшего развития крупных торговых центров в структуре города Астаны. При изучении крупных торговых центров внимание уделено такому важному аспекту, как удобное ежедневное обслуживание населения. Значительные расстояния для поездки в торговые центры не способствуют улучшению сферы торговли и условий проживания населения. В этой связи повышение комфортности проживания населения города становится связано с его передвижением и затратами времени. Повысить посещаемость горожан в торговых объектах социальной инфраструктуры возможно при учете их расположения относительно жилых районов города. Исследование отражает проблему отдаленного расположения крупных торговых центров для населения, которое проживает в периферийных жилых районах. В исследовании изучается современное значение торговых объектов в социальной жизни человека. Также рассматривается изменение частоты пользования торговыми объектами населением города в повседневной жизни. В ходе изучения показано расположение крупных торговых центров на территории города Астаны в структуре административно-территориальных районов. Изучение крупных торговых объектов города показало сосредоточение данных учреждений на центральных территориях города. Для повышения доступности торговых учреждений для населения, улучшения условий проживания в микрорайонах предложены возможные решения. В статье выявляется важность создания гармоничного соседства торговых и других общественных учреждений в жилых районах, что влияет на эффективность объектов социальной инфраструктуры для населения города. В статье подчеркивается актуальность крупных торговых центров в структуре городского обслуживания. При этом важным моментом является учет организации удобства для горожан в жилых районах.

Ключевые слова: крупные торговые центры, планировочная структура, объекты социальной инфраструктуры, урбанизация, функциональное зонирование, территория.

Аңдатпа. Бұл мақалада Астана қаласының құрылымындағы ірі сауда орталықтарын одан әрі дамыту перспективалары қарастырылған. Ірі сауда орталықтарын зерделеу кезінде тұрғындарға ыңғайлы күнделікті қызмет көрсету сияқты маңызды аспектілерге назар аударылады. Сауда орталықтарына баратын жолдың айтарлықтай қашықтығы сауда саласын және халықтың тұрмыс жағдайын жақсартуға ықпал ете алмайды. Осыған байланысты қала тұрғындарының өмір сүру жайлылығын арттыру тұрғындардың қозғалысы мен уақыт шығынымен байланысты болады. Қаланың елді мекендеріне қатысты орналасуын ескере отырып, әлеуметтік инфрақұрылымның бөлшек сауда объектілері азаматтардың келу санын арттыруға мүмкіндік береді. Зерттеу перифериялық елді мекендерде тұратын тұрғындар үшін ірі сауда орталықтарының шалғайда орналасуы проблемасын көрсетеді. Зерттеуде сауда орындарының адамның әлеуметтік өміріндегі қазіргі маңызы зерттеледі. Қала тұрғындарының күнделікті өмірінде сауда нысандарын пайдалану жиілігінің өзгеруі де қарастырылған. Зерттеуде өкімшілік-аумақтық округтер құрылымында Астана қаласындағы ірі сауда орталықтарының

орналасуы көрсетілген. Қаладағы ірі сауда нысандарын зерттеу бұл мекемелердің қаланың орталық аудандарында шоғырланғанын көрсетті. Сауда орындарының халыққа қолжетімділігін арттыру және елді мекендердегі тұрмыс жағдайын жақсарту үшін ықтимал шешімдер ұсынылады. Мақалада қала тұрғындары үшін әлеуметтік инфрақұрылымның тиімділігіне әсер ететін тұрғын аудандарда сауда орындарының үйлесімді көршілестігін құрудың маңыздылығы ашылған. Мақалада ірі сауда орталықтарының қалалық қызмет көрсету құрылымындағы өзектілігі атап өтілген. Бұл ретте тұрғындардың тұрғын үй алаптарындағы ыңғайлылығын ұйымдастыруды ескеру маңызды критерий болып табылады.

Кілт сөздер: үлкен сауда орталықтары, жоспарлау құрылымы, әлеуметтік инфрақұрылым объектілері, урбанизация, функционалдық аймақтарға бөлу, аумақ.

Annotation. This article discusses the prospects for further development of large shopping centers in the structure of Astana. When studying large shopping centers, attention is paid to such important aspects as convenient daily service for the population. Significant distances for traveling to shopping centers do not contribute to the improvement of the trade sector and living conditions of the population. In this regard, improving the comfort of living of the city's population is associated with the movement of the population and time costs. Taking into account the location relative to residential areas of the city, social infrastructure shopping facilities can increase the attendance of citizens. The study reflects the problem of the remote location of large shopping centers for the population living in peripheral residential areas. The study examines the modern significance of shopping facilities in human social life. It also considers the change in the frequency of use of shopping facilities in the everyday life of the city's population. The study shows the location of large shopping centers on the territory of Astana in the structure of administrative-territorial districts. The study of large shopping facilities of the city showed the concentration of these institutions in the central areas of the city. Possible solutions are proposed to increase the availability of shopping institutions for the population and improve living conditions in microdistricts. The article reveals the importance of creating a harmonious neighborhood of shopping establishments in residential areas, which affects the efficiency of social infrastructure facilities for the city's population. The article emphasizes the relevance of large shopping centers in the structure of urban services. At the same time, an important point is to take into account the organization of convenience for citizens in residential areas.

Keywords: large shopping centers, planning structure, social infrastructure facilities, urbanization, functional zoning, territory.

Введение. В настоящее время Астана имеет большое количество объектов торговли, сложившихся в результате роста населения города. Данный объект социальной инфраструктуры в планировочной структуре города представлен учреждениями различного направления, среди которых наиболее крупными являются многофункциональные объекты – торгово-развлекательные центры и торговые дома. Многофункциональность данных объектов является значительным преимуществом в структуре городских планировочных районов. Несмотря на их активное строительство, крупные объекты торговли часто располагаются в градостроительных узлах. В структуре города наблюдается проблема их концентрации лишь на определенных территориях, что вызывает трудности с их посещением. Нехватка данных объектов вызывает в городской планировочной структуре проблему – автомобильную перегруженность дорог, что уменьшает доступность данных объектов. Данные моменты требуют внимания с учетом их системного размещения в городских районах, что повышает актуальность и значимость исследования.

Торговые объекты влияют на развитие территории города, затрагивая социокультурное развитие как образ жизни человека. С появлением крупных торговых объектов социальной инфраструктуры планировочная структура города претерпевает изменения. Изменения в форме досуга, процессах торговых услуг связаны с возможностью удовлетворения торговых и культурных потребностей населения. Важным моментом является то, что возникают новые пространственные связи, которые реализуются путем востребованности объектов у населения. Актуальность данного исследования выражается в эффективной организации доступного обслуживания населения на территории города.

Целью данного исследования является рассмотрение и анализ крупных торговых объектов социальной инфраструктуры в городе Астане. Значимым акцентом является

рассмотрение существующей ситуации и формулировка предложений по повышению доступности учреждений для населения. Важным в этом ракурсе является организация комфортности и безопасности пешеходных путей и их связи во внутреннем пространстве города.

Новизна данного исследования состоит в рассмотрении торговых объектов под призмой изменяющихся социокультурных потребностей и пространственных связей. Основным момент, отраженный в исследовании, касается необходимости рассмотрения торговых учреждений с учетом современных требований комфорта, экологии и безопасности.

Задачи исследования включают следующее:

- рассмотреть крупные торговые объекты социальной инфраструктуры в планировочной структуре города;
- анализ расположения объектов относительно административно-территориальных районов города Астаны;
- изучить влияние главных магистралей на крупные торговые объекты социальной инфраструктуры;
- рассмотреть влияние транспортных потоков;
- разработать предложения по повышению доступности крупных торговых объектов социальной инфраструктуры.

Исторические моменты образования объектов проанализированы на примерах торговых учреждений начала XX века (Воронцова, 2017). В трудах Чекаева Ф.М. рассматривается история возникновения торговых учреждений на центральной площади города (Чекаев, 2009; Глаудинов Б.А., 1999; Народное хозяйство Казахстана за 70 лет, 1990). Значительная роль отводится изучению значения визуальных эффектов в коммуникационных пространствах крупных торговых центров (Воронцова, Ю. С., Каракова, Т. В., 2016; Каракова, Т. В., 2023). Взаимосвязь экологических факторов и развития торговых центров рассматривается в трудах отечественных ученых (Корнилова, Сарсембаева, 2020; Kornilova, Khorovetskaya, Sarsembayeva et al., 2019). Также учеными отражена степень влияния крупных объектов в структуре общественных центров (Тоскина, 2002).

Изучены работы по идентичности и оригинальности проектирования архитектурных объектов в городской среде (Abdrassilova, Danibekova, Tuyakayeva, Syzdykova, 2024).

Развитие объектов на территории зарубежных стран проходило смену функционального назначения помещений внутри торговых центров (Юдина, 2019). Большая часть трудов зарубежных авторов в области торговых центров посвящена изучению влияния торговых объектов в структуре социальных потребностей (Luis Alfonso Escudero-Gómez, 2024; Lian, H., Li, G., 2023; H. Lian, X. Li, W. Zhou et al., 2025).

В исследовании рассмотрены и проанализированы статистические данные торговых центров, рассмотрены современные нормативные документы, закрепляющие возможности проектных решений (СП РК 3.01-101-2013, 2024; СП РК 3.02-122-2012, 2018).

Данное исследование нацелено на повышение доступности крупных торговых учреждений для населения города Астаны. Разработка предложений посредством изучения проблематики торговых объектов социальной инфраструктуры может способствовать обеспечению качества и комфорта обслуживания населения города.

Материалы и методы исследования. При подготовке исследования проводился анализ существующего положения торговых объектов на примере города Астаны. Метод натурного исследования позволил установить пространственные связи объектов социальной инфраструктуры.

Исследование включает изучение литературных источников отечественной и зарубежной литературы. Метод сравнительного анализа показал причины проектирования

торговых учреждений в определенных местах, также выявил степень воздействия отдаленного расположения объектов торговли.

При разработке предложений по расположению крупных торговых объектов применялись графические аналитические схемы. Данные схемы позволяют оценить доступность крупных торговых учреждений.

Изучение генеральных планов способствует анализу расположения торговых учреждений.

Метод обобщения результатов позволяет систематизировать полученные выводы и сформулировать предложения по размещению крупных торговых объектов социальной инфраструктуры на примере города Астаны.

Результаты и их обсуждение. Возрастание населения в городе формирует спрос на лучший ассортимент, качество услуг, транспортную доступность. Меняются способы совершения покупки, форма досуга, что меняет городское розничное предложение, которое должно адаптироваться к изменяющимся потребностям населения. Рассматриваемая тематика торговых объектов показывает существующий спрос на качество торговых объектов.

Исследование нацелено на создание нового торгового пространства многофункционального шопинга и отдыха для населения города, где можно получить уникальную возможность беспрепятственных систем услуг без климатических затруднений.

Важной политикой является розничная торговля, которая способна улучшить количество и качество торговли, следовательно, торговой среды. Также спрос на торговлю определяется наличием занятого населения в городе.

Торговая среда способствует развитию основных торговых центров и связей между ними посредством:

- 1) сосредоточения нового развития розничной торговли;
- 2) организации движения между ними путем улучшения розничной среды вдоль торговых связей.

Необходимо организовать среду торговых пространств по всему городу для удовлетворения будущего спроса. Необходимо расположение крупных торговых объектов в пределах или вблизи крупных микрорайонов. Если крупные центры определены своим расположением, то рядом с ними есть перспектива создания торговых связей, расширения розничного предложения в городе. Эти связи могут поддержать основную деловую функцию и растущую культурную активность в городе. Улучшение пешеходных переходов и предложение розничной торговли в торговых центрах будут стимулировать покупателей переходить из одного торгового центра в другой.

Рассмотрению принципов размещения торговых учреждений посвящено значительное количество отечественных и зарубежных примеров исследований. Отмечается широкое внимание к данному вопросу в современных проектах городов развитых стран.

Ранним примером исторического развития торговых центров являются ярмарки, торговые ряды и гостиные двory на центральных территориях городов.

Важен пример пространственного решения в архитектуре здания Хрустального Дворца на Международной выставке достижений науки, промышленности, искусства и торговли в Лондоне (1851 г.). Данное строение оказало влияние на возможность строительства торговых зданий с освещенными витринами с большим количеством товаров.

Открытие верхних торговых рядов (ГУМ – Государственный универсальный магазин) в 1893 году на месте старых лавок XVIII века улучшило условия торговли в центральном районе Москвы. Наряду с торговыми функциями, данный объект одновременно

располагал к отдыху и развлечениям. Торговые ряды придали порядок и повлияли на формирование выразительного архитектурного образа центрального района города.

В теории рассмотрения крупных улиц города Астаны необходимо подчеркнуть важность торговых зданий в городе. Возрастание роли торговли в регионе в XXI веке показывает строительство дома купца Кубрина, торговых рядов. Данные здания позволили закрепить развитие центральных городаских улиц и сформировать новый вид зданий в городе. Торговые здания способствовали группированию общественных зданий вокруг центральной улицы.

Крупные торговые центры начали активно появляться в конце 30-х – начале 40-х годов XX века в США. Данный процесс обусловлен кризисом городских центров в ходе увеличения транспорта. Увеличение транспорта на дорогах, плотность центральных районов, отсутствие парковочных мест послужили причиной строительства торговых центров на свободных территориях за городом. Данные территории вблизи межгородских автострад активно застраивали крупными торговыми центрами, окруженными большими автостоянками (до 10 тыс. автомобилей).

Одним из важных моментов явилось создание в 1964 году вблизи транспортного узла торгового центра «Булл ринг центр» в Бирмингеме (Великобритания). Исторический торговый район открытых и крытых рыночных киосков определил строительство данного центра и автобусных станций.

Необходимо отметить, что при развитии современных городов ослабла тенденция строительства крупных торговых центров за пределами города. С усилением тенденций урбанизации в мегаполисах становится важным сосредоточить в многофункциональном торговом здании условия транспорта, парковок и пешеходных путей. Важным этапом развития явилось стремление объединить торговые и жилые функции в 1980-е годы в торговых центрах Нью Йорка.

В концепции развития города Сеула уделяется внимание развитию окрестностей, прилегающих к историческому ручью Чхонгечхон. В 2004 году он был открыт как общественное пространство на месте отреставрированного ручья. Для его строительства множество мелких торговых лавок было перемещено в другие части города. Крупные торговые магазины размещаются вблизи туристической территории, что связано с постоянным наличием большого количества горожан.

Зарубежные исследования в этой области подтверждают, что меняется значение торговых центров для населения в городах. Прежде всего это связано с активным ростом розничной торговли в сети. Упрощенный способ доставки разных товаров приводит к отказу покупателей от прежнего посещения магазина и поиска. Это сказывается на количестве посетителей магазинов.

Важно рассмотреть данные направления на примере современных крупных торговых объектов социальной инфраструктуры, так как внимание к эффективной организации торговых зданий является основой для создания комфортного расположения зданий внутри города – транспортной доступности и организации центров в контексте урбанистики.

Новизна данного исследования заключается в рассмотрении проблемы размещения крупных торговых объектов в городе Астане. Отличие авторской работы от ранее опубликованных состоит в анализе расположения торговых объектов в городе Астане с учетом доступности и изменения потребностей населения. Ранее исследования акцентировали внимание на проектировании уникальных торговых зданий и не предусматривали пешеходных связей между собой.

Также авторское исследование рассматривает разработку конкретных предложений для создания комфортного размещения крупных торговых объектов в структуре города.

Данные мероприятия позволяют предложить градостроительные решения для улучшения доступности торговых объектов в городе Астане.

В настоящее время в городе Астане располагаются крупные торговые центры: ТРЦ «Хан Шатыр», ТРЦ «Mega Silk Way», ТРЦ «Сарыарка», ТРЦ «Керуен сити», ТРЦ «Керуен», ТРЦ «Евразия», ТРЦ «Аружан», ТРЦ «Азия парк», ТРЦ «Astana Mall» (табл. 1). Многофункциональное здание «Абу-Даби Плаза» включает жилые, офисные и торговые помещения. Большинство данных объектов преимущественно находится на Левобережье, что уменьшает охват обслуживания населения.

Население города Астаны составляет 1 354 556 тысяч человек. Ежегодно население города возрастает в среднем на 50 тысяч человек (Численность населения Республики Казахстан по отдельным этносам на начало 2023 года, 2023). Территория города разделена на 6 административно-территориальных районов. В районах «Есиль», «Алмата», «Нура» присутствуют торгово-развлекательные центры, тогда как в трех других отмечается их отсутствие.

Таблица 1. Торгово-развлекательные центры города Астаны

Административно-территориальные районы города Астаны					
Сарыарка	Байконур	Алмата	Есиль	Нура	Сарайшык
-	-	- ТРЦ «Astana Mall» - ТРЦ «Аружан» - ТРЦ «Евразия»	- ТРЦ «Mega Silk Way» - ТРЦ «Керуен»	- ТРЦ «Хан Шатыр» - ТРЦ «Азия парк» - ТРЦ «Сарыарка» - ТРЦ «Керуен сити»	-
<i>Примечание – составлено автором (Сарсембаева Д.Е., 2025)</i>					

Одновременно со строительством жилых районов рядом с ними располагают в большом количестве супермаркеты и продуктовые магазины. Однако многофункциональные торговые центры расположены в центральных районах города. С развитием онлайн-торговли посещение торговых магазинов ослабевает. При этом повысилась необходимость строительства многофункциональных торговых объектов, которые могут предлагать в одном здании услуги разных учреждений обслуживания. В данных объектах важно учитывать аспект удобства и комфортности посетителей. В настоящей статье рассматривается проблема доступности крупных торговых объектов для населения города и вырабатываются оптимальные варианты ее решения.

Крупные торговые центры Астаны спроектированы вблизи главных магистралей города, что позволяет повысить доступность объектов для горожан. Однако в Астане данное размещение группирует множество таких объектов в одной части города, создавая перегруженность дорог в данном направлении. Также нет вовлеченности населения жилых комплексов путем организации связей между торговыми объектами. Организация связи необходима для учета пешеходных зон и превращения их в полноценную прогулочную аллею. Такая аллея должна располагать к отдыху и одновременно на всем своем протяжении организовывать пешеходную связь крупных торговых объектов и жилых комплексов.

Водно-зеленый бульвар в административно-деловом центре Астаны является пешеходной зоной, где представлены учреждения сферы обслуживания и общественного

питания, выставочные залы, офисы и прочие заведения. Бульвар вытянут от здания Резиденции президента Ак-Орда до торгово-развлекательного центра Хан-Шатыр. На бульваре наблюдается система связи общественных и жилых функций, что повышает роль данных объектов в жизни горожан. Доступность объектов разного назначения формирует комфортную среду проживания населения на данной территории.

Нормативные документы, регламентирующие параметры размещения крупных торговых центров, рассматривают основные вопросы размещения данных объектов. В особенности нормируются радиусы предприятий торговли, общественного питания и бытового обслуживания местного значения, размещенных в жилой застройке от 500 до 800 метров. Для крупных объектов торговли принимается во внимание расстояние от 25 м от жилых объектов с соблюдением норм парковочных мест.

Для выявления взаимосвязи среди населения с крупными торговыми объектами был разработан и проведен опрос на тему «Крупные торговые объекты города Астаны».

Проведение опроса позволило рассмотреть расположение крупных торговых объектов в городе Астане с учетом мнения горожан. Было опрошено население в следующих 4 возрастных группах: I – до 15 лет; II – до 40 лет; III – до 60 лет; IV – старше 60 лет.

В результате проведения опроса среди населения по ответам на вопрос «Как часто посещаете крупные торговые объекты в городе?» было установлено, что частота посещения среди молодежи составляет в среднем 2-3 раза в месяц, среди старшего населения – 1 раз. С изменением образа жизни человека произошла перестройка графика населения, где стала важной многофункциональность торгового здания. В данное время крупные торговые центры ассоциируются с наличием образовательных и спортивных кружков, кинотеатров и фудкортов. Обособленность данных центров формирует среду, где житель города должен преодолевать огромные расстояния для получения услуг центра. В связи с этим необходимо проектировать объекты социальной инфраструктуры с учетом объединения структур жилья и торговли с единым пешеходным пространством.

По ответам на вопрос «Какие торговые пространства посещаете в крупных торговых объектах?» в результате проведения опроса среди населения было выявлено, что 59 % опрошенных посещают пространства продажи одежды, 11 % – супермаркеты, 23 % – кинотеатры и рестораны, 7 % – салоны красоты. В структуре зарубежных городов отражается тенденция к размещению крупных центров внутри города для создания комфортного образа жизни занятого населения. В городах отмечается наличие активного занятого населения и стремление производить офлайн-покупки в обеденное время будних дней. Данное поведение покупателей показывает, что выходные дни большая часть населения стремится провести дома. Так розничная торговля становится дополнительным элементом при сочетании с другими сферами услуг в одном здании (банк, аптека, ресторан, фитнес).

В результате проведения опроса среди населения были выявлены причины, сдерживающие жителей от посещения крупных торговых объектов, среди которых 40 % опрошенных назвали отдаленность, 20 % – неудобства паркинга, 5 % – высокие цены, остальные опрошенные указали другие причины. Градостроительные особенности проектирования торгового здания включают такие моменты размещения, как удобство парковочных мест, расстояния от жилых зданий, радиусы обслуживания. В проектировании рекомендуется текущая норма радиуса обслуживания в 500-800 метров в пределах жилого района, что для крупных торговых объектов не оправдано. Необходимо для крупных объектов предусматривать норму в формате 1500-2000 метров для охвата нескольких жилых районов. Это приблизит услуги учреждений к населению, увеличит посещение торговых учреждений населением микрорайонов.

Рассматривая расположение крупных торговых центров в городе Астане можно отметить, что в основном здания расположены в Левобережной части города. В Правобережной части города данные объекты присутствуют рассредоточенно, что не позволяет обеспечить доступность этих объектов для населения отдаленных территорий города на постоянной основе. Из этого следует, что крупные торговые центры остаются для большего числа населения объектами эпизодического обслуживания, что уменьшает возможный поток посетителей. Учреждения не предоставляют возможности для улучшения повседневного и периодического обслуживания. Также нерациональное размещение крупных торговых центров приводит к увеличению загруженности дорог в данных направлениях.

Организация пешеходного пространства между жилыми и общественными зданиями позволит сократить расход времени и создать условия доступности учреждений. Данные меры позволяют повысить доступность учреждений за счет комфортности пешеходных путей, которые будут стимулировать горожан ежедневно пользоваться услугами крупных торговых центров.

Опыт зарубежного благоустройства территории вокруг ручья Чхонгечхон в Сеуле показывает положительное влияние на развитие территории жилых районов и на торговые пространства. По исследованию реконструированного ручья Чхонгечхона было выявлено благоприятное влияние на развитие зон, прилегающих к нему. В середине XX века ручей был сильно загрязнен сбрасываемыми отходами. В результате ручей был помещен в трубу, на месте была построена надземная автомобильная эстакада после Корейской войны. Учитывая состояние развязки, в 2003 году эстакада была демонтирована. В 2005 году в результате реконструкции ручей был воссоздан в ландшафтный парк с фонтанами и 22 мостами. Данная территория является местом для проведения праздников, выставок. Ручей на всем протяжении в 11 километров создает микроклимат участка, что является важным для горожан и туристов. Многочисленное население обеспечивает большее количество посетителей близко расположенных учреждений. Реконструкция сопровождалась перемещением 30 тысяч уличных торговцев рынков данного района. Кроме того, данный объект является связующим пешеходным пространством между объектами социальной инфраструктуры.

В результате отмечается степень влияния, которая выражается в следующем:

Во-первых, холмистый рельеф и гидрология способствовали стать ручью естественным водосборным бассейном для обширной площади.

Во-вторых, произошло оживление прилегающих районов, которые до строительства магистрали в 1960-е гг. являлись трущобами, а после строительства эстакады превратились в серую и безликую транзитную зону.

В-третьих, территория была значительно озеленена, что способствовало изменению стоимости окружающей недвижимости, увеличению доли застраиваемости офисных площадей и началу активного строительства на данном участке.

Выполнение связующего звена между домами и другими зданиями возможно при организации пешеходной зоны. На территории Астаны проектировать торговые центры необходимо с обустройством пешеходно-прогулочных зон. Градостроительная задача состоит в том, чтобы с учетом рельефа, климата и застройки связать торговые здания и жилье в единую комфортную среду.

Большинство современных торговых центров расположены обособленно, без учета связей с жилыми и другими общественными зданиями. Это ведет к меньшему объему посетителей в часы обеда, в свободное вечернее и в дневное время, так как создает большой разрыв во времени. При проектировании современных торговых центров необходимо учитывать изменение образа жизни человека, который включает ежедневные

направления: дом, работа, учеба, отдых. Исходя из этих направлений, торговые центры могут включать такие сферы услуг досуга населения, как творческие кружки, кинотеатры, библиотеки, фитнес, рестораны, кафе и др.

В Казахстане, согласно СП РК 3.02-122-2012 Предприятия розничной торговли, пункту 4.1.3, рассматриваются приемлемые решения, где крупные объекты торговли свыше 8500 м² торговой площади рекомендуется проектировать с учетом местных градостроительных условий, интенсивности и структуры трудовых и культурно-бытовых связей населения, контингента посетителей и пр. (табл. 2). Данные рекомендации учитывают наличие особенностей территории.

Таблица 2. Радиус обслуживания населения учреждениями и предприятиями, размещенными в жилой застройке

Учреждения и предприятия обслуживания	Радиус обслуживания, м
Предприятия торговли, общественного питания и бытового обслуживания местного значения: в городах при застройке:	
- многоэтажной	500
- малоэтажной	800
<i>Примечания</i> <i>В населенных пунктах со сложными планировочными структурами (вытянутой конфигурацией и др.), обусловленными рельефом местности, очертанием береговой полосы и другими природно-ландшафтными факторами и в условиях реконструкции, при соответствующем обосновании, по заданию на проектирование, указанные радиусы доступности увеличивают до 10 %, а также в пределах радиуса транспортной доступности. В зоне пустынь и полупустынь, в условиях сложного рельефа указанные в таблице радиусы обслуживания следует уменьшать до 30 %.</i> <i>Примечание – составлено автором на основе СП РК 3.01-101-2013 Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских населенных пунктов (Сарсембаева Д.Е., 2025)</i>	

Проведенные исследования показали, что большинство крупных торговых центров имеют в своем составе сферы услуг досуга. Однако из-за индивидуального принципа проектирования зданий без продумывания условий гармонизации жилого района многие торговые объекты социальной инфраструктуры не имеют связи с жилыми комплексами через пешеходно-прогулочные зоны. Также ключевым компонентом является учет климатических условий региона, которые обостряют проблему прогулочных территорий в зимнее время. В этой связи организация пространства, связывающего жилье и торговые центры, важна для досуга населения. Рациональным принципом может стать организация зон отдыха в прогулочных зонах, продумывание композиционных связей торговых центров и жилых зданий.

В условиях плотной застройки крупных городов важно организовать пространство для отдыха и досуга населения, что обуславливает организацию условий для горожан с учетом экономии времени. Необходимо отметить, что сосредоточение объектов социальной инфраструктуры в градостроительных узлах благоприятно сказывается на композиционно-пространственном решении города. Территориальный рост районов города отдаляет горожан от данных центров, в связи с этим становится важным создание данных центров вблизи жилых районов и обустройство пешеходных зон к ним.

Торговые центры в Америке, особо популярные в 1980-2000 годы, стали терять востребованность с ростом онлайн-торговли и сменой покупательских привычек. Объекты торговли были местом для встреч с друзьями, прогулок и одновременно

шопинга. С развитием мессенджеров и онлайн-торговли социальные привычки изменились (Каракова, 2023).

В современное время происходят изменения в покупательской активности. Важно отметить, что близкое расположение к дому и состав помещений торгового центра влияют на частоту посещения. Моменты с развитием розничной торговли требуют учета функций, которые несут для общества. Торговая и развлекательная функции центров нуждаются в дополнении такими услугами, как организация культурного отдыха. При этом центры должны пройти процесс интеграции с существующими улицами и прогулочными зонами, создавая непрерывную линию. Наполнение центра должно меняться в сторону качественных кинотеатров, ресторанов, супермаркетов, встроенных остановок, адаптированных выставок, сцен для мероприятий.

Развитие мегаполиса в современных условиях характеризуется важным моментом формирования социально значимых пространств нового качества и функционального содержания. Такие крупные торговые центры способны отразить изменение структуры потребностей жителей города, их потребительского и пространственного поведения. Многочисленные исследования междисциплинарного характера демонстрируют, что архитектура и дизайн городской среды связаны с динамикой психологических и материально-пространственных проявлений потребностей населения, спроса в услугах и товарах, формирования новых центров притяжения населения и, как следствие, локализации новых направлений в функционально-планировочной структуре города в целом, а также в рамках отдельного объекта обслуживания.

Исследование сферы услуг и потребления в России в 90-х гг. основало не только разработку новых форматов торговли, но и определение локации этих объектов в планировочной структуре города. Изучение вопроса показало, что сложившаяся классификация потребностей в сфере получения материальных благ (товаров) предопределена рядом стадий, когда происходит:

- а) осознание необходимости приобретения товара или услуги;
- б) минимизация временных затрат на приобретение товара или услуги;
- в) комплексное решение возникших задач в ходе реализации потребности приобретения товара или услуги;
- г) приобретение товара или услуги в объектах с высоким уровнем обслуживания, использованием современных технологий и аутентичными эстетическими характеристиками.

Такие характерные черты сформировали ряд причин, по которым торгово-развлекательные центры заняли лидирующее место, конкурируя с культурными учреждениями, одной из которых является способность аккумуляции в одном здании точек торговли, различных выставок, пунктов общественного питания, рекреаций и кинотеатров. Функционально-планировочные возможности подчеркивают важность учета зданий при изменении потребительского и пространственного поведения жителей городов. Организация формы досуга в данных зданиях сопряжена с особой ролью транзитного пространства пешеходной зоны в масштабе местного жилого района и городского. Мировая практика градостроительства уделяет большое внимание созданию стрит-ритейл территории городов. Торговые участки в городе влияют на привлечение и горожан, и туристов.

Проблема транспортной доступности крупных торговых центров сводится к избирательному типу посещения данных учреждений. Высокие темпы урбанизации и застройки в городе Астане ведут к постоянному увеличению жилых районов и коммерческих учреждений. Этот процесс сопровождается строительством новых дорог и развязок. В современное время для сокращения времени в пути необходимо учитывать

развитие инфраструктуры для пешеходов и велосипедистов. Внимание к этому вопросу повысит безопасность участников дорожного и пешеходного движения, уменьшит пробки в городе.

При проведении исследования рассмотрены наиболее крупные торговые центры в городе Астане. В исследовании административно-территориальных районов города выявлено следующее:

- наличие крупных торговых центров в Левобережной части города;
- расположение вблизи главных магистралей;
- отсутствие связи торговых центров с пешеходной территорией.

В результате проведения исследования выработаны предложения для улучшения доступности торговых центров:

- организация пешеходных пространств, связывающих жилые и общественные здания;
- приближение радиусов обслуживания торговых центров к жилым районам;
- увеличение озелененных территорий для повышений показателей шумоизоляции;
- улучшение условий пребывания в прогулочных зонах вне зависимости от времени года и погодных условий путем организации крытых пространств;
- организация парковочных зон.

В результате проведенного исследования выявлена необходимость строительства торговых центров в планировочной структуре с города со связью с жилыми районами. Строительные нормы и правила при описании важно пересмотреть и дополнить в соответствии с изменением потребностей населения. Необходимо учитывать радиусы обслуживания крупных торговых центров в пределах обслуживания нескольких жилых районов, что позволит эффективно распределить объекты в городе. Данные меры закрепят приемлемые для населения города условия комфортности и безопасности в жилых районах.

Схема расположения торговых объектов социальной инфраструктуры города Астаны (рис. 1) показывает, что крупные торгово-развлекательные центры располагаются в административно-территориальных районах Есиль, Алмата и Нура. В центральном районе города сконцентрированы данные виды учреждений, что приводит к эпизодической частоте пользования.

Для населения, проживающего на периферии, не спроектированы данные типы зданий в их районах. В районах Сарыарка, Байконур, Сарайшык крупные торговые центры отсутствуют, что говорит о необходимости преодоления больших расстояний для получения услуг. На Левобережье ТРЦ «Хан Шатыр», ТРЦ «Mega Silk Way», ТРЦ «Сарыарка», ТРЦ «Керуен сити», ТРЦ «Керуен», ТРЦ «Азия парк» соседствуют с участками Водно-зеленого бульвара, что создает связь с жилыми зданиями Правобережья. Крупные торговые центры, расположенные на Правом берегу не связаны с прогулочными аллеями. Ориентированность на пешеходно-прогулочные пути создает возможность включения услуг торговых центров для населения жилых и административных зданий.

Исследования торговых центров показали, что существует необходимость связи жилых и торговых зданий в пешеходной прогулочной зоне. Условия данной организации должны включать наличие крупных торговых объектов вблизи жилых районов. Это в свою очередь позволяет приблизить доступность данных объектов для населения. Распределение торговых объектов внутри города значительно меняется при рассмотрении услуг торговых центров в ракурсе ежедневных и периодических потребностей. Так эпизодическая частота пользования приводит к исключению пользования услугами центра в жизни населения, уменьшается их важность и вместе с этим возможности развития подобных зданий.

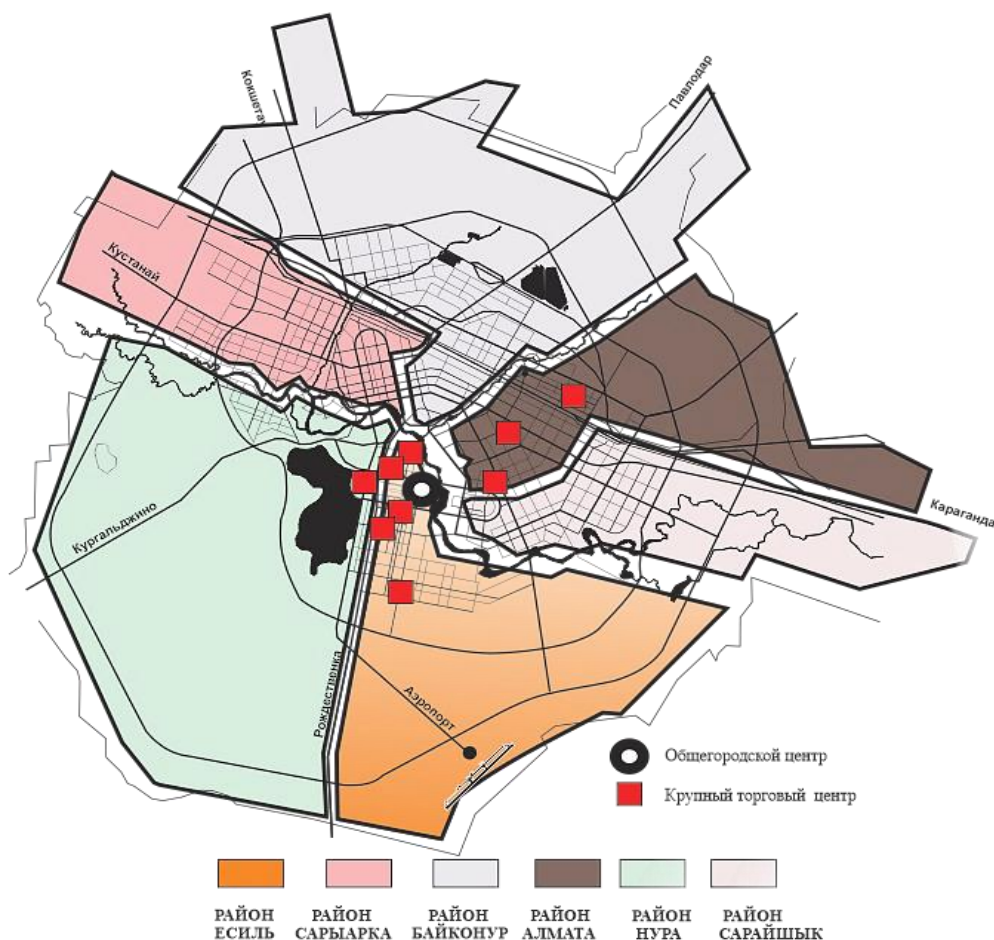


Рисунок 1. Расположение крупных торговых центров в городе Астане

Примечание – иллюстрация автора (Сарсембаева, 2025)

Рациональное размещение крупных торговых центров на территории города Астаны требует соблюдения данных моментов. При этом исторически сложившаяся застройка улиц может дополняться для улучшения системы обслуживания. Важным дополнением к общественным объектам является размещение учреждений торговли с учетом идентичности и оригинальности их проектирования в городской среде. Использование выработанных решений позволит приблизить услуги крупных торговых центров для населения города Астаны и эффективно организовать транспортные потоки.

Также важным пунктом исследования является отражение социальной роли крупных торговых центров в жизни населения, которая требует интеграции данных учреждений в повседневную жизнь человека путем организации досуга и прогулочного отдыха населения.

Закключение. В проектировании современных торговых центров меняется покупательская активность с изменением розничной торговли. Онлайн-покупки и онлайн-общение становятся более актуальным для населения. Магазины трансформируются в выставочные шоурумы, где можно посмотреть товар и заказать потом. Поход в центры рассматривается как прогулка в кино или ресторан, где наличие фуд-кортов является благоприятствующим фактором.

Стимулирующим фактором развития торговых объектов является приверженность к улучшению условий жизни населения всего города Астаны. Благотворным моментом является проектирование крупных торговых центров в масштабе периодического обслуживания, что влияет на образ жизни современного человека.

В результате исследования торговых объектов были выработаны следующие решения:

1. Включение крупных торговых центров в радиус обслуживания 4-5 жилых районов (1500-2000 м). Рассмотрение новых норм в строительных нормах и правилах Республики Казахстан позволит приблизить учреждения обслуживания и их услуги к населению.

2. Воссоздание экологических пешеходно-прогулочных территорий для повышения доступности крупных торговых центров для населения. Данные зоны способны нивелировать отрицательное воздействие климатических условий (например, перепады температуры).

3. Создание связи жилых и торговых зданий выражается в необходимости комплексного планирования жилых районов. В этой связи важно организовать пешеходно-прогулочные зоны.

Основным моментом исследования является внимание к таким особенностям, как стремление населения посещать торговые центры в часы обеда или выходные дни. Этим обусловлен подход исследования, где все большее внимание в эксплуатации центров уделяется услугам ресторанов, фитнес-центров, кинотеатров, супермаркетов и магазинов в целом. Исследование крупных торговых центров показало необходимость связывания жилых и торговых зданий посредством организации прогулочных аллей между ними, включения данных объектов в пределы доступности жилых районов города.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данное исследование выполнено на основе собственных средств автора.

Список литературы

- Воронцова Ю.С. (2017). Эволюция приемов создания коммерческой привлекательности Российских торговых центров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. – Т. 19. – № 2. – С. 63-67 // Voroncova Yu.S. (2017). Evolyuciya priemov sozdaniya kommercheskoj privlekatel'nosti Rossijskih torgovyh centrov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. Social'nye, humanitarnye, mediko-biologicheskie nauki. – Т. 19. – № 2. – 63-67
- Чекаев Ф.М. (2009). Истоки и эволюция архитектуры Астаны (Акмолы) 1830-1991 годов: автореф. дис.... канд. архитектуры. – Алматы, 30 с. // Chekaev F.M. (2009). Istoki i evolyuciya arhitektury Astany (Akmoly) 1830-1991 godov: avtoref. dis.... kand. arhitektury. – Almaty, 30.
- Глаудинов Б. А. (1999). История архитектуры Казахстана. Алматы: КазГАСА, 295 с. // Glaudinov B. A. (1999). Istoriya arhitektury Kazahstana. Almaty: KazGASA, 295 s.
- Народное хозяйство Казахстана за 70 лет: статистический сборник. (1990) / Государственный комитет Казахской ССР по статистике. – Алма-Ата, 391 с. // Narodnoe hozyajstvo Kazahstana za 70 let : statisticheskij sbornik. (1990). / Gosudarstvennyj komitet Kazahskoj SSR po statistike.-Alma-Ata, 391 s.
- Воронцова, Ю.С., Каракова, Т.В. (2016). Значение визуальных эффектов в коммуникационных пространствах крупных торговых центров / Ю.С. Воронцова, Т.В. Каракова // Приволжский научный журнал. – № 2 (38). – С. 133-137 // Voroncova, Yu. S., Karakova, T.V. (2016). Znachenie vizual'nyh effektov v kommunikacionnyh prostranstvah krupnyh torgovyh centrov / Yu.S. Voroncova, T.V. Karakova // Privolzhskij nauchnyj zhurnal. – № 2 (38), 133-137.
- Каракова Т.В. (2023). Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. – Т. 25. – № 2 (89). – С. 64-69. // Karakova T.V. (2023). Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. Social'nye, humanitarnye, mediko-biologicheskie nauki. – Т. 25. – № 2 (89), 64-69.

- Корнилова А.А., Сарсембаева Д.Е. (2020). Рекреации в архитектуре социальной инфраструктуры: на примере города Нур-Султан // Глобальная наука и инновация 2020: Центральная Азия: матер. междунар. конф. – НурСултан. – С. 37-41. // Kornilova A.A., Sarsembaeva D.E. (2020). *Rekreacii v arhitekture social'noj infrastruktury: na primere goroda Nur-Sultan* // *Global'naya nauka i innovaciya 2020: Central'naya Aziya: mater. mezhdunar. konf.* – NurSultan. – S. 37-41.
- Kornilova A.A., Khorovetskaya Ye.M., Sarsembayeva D.Ye. et al. (2019). Territory Management: Urban Planning and Recreational Planning of Populated Areas in the Republic of Kazakhstan in the Second Half of the 20th Century // *Journal of Environmental Management and Tourism*, 10(6), 1295-1302 (2019), DOI: [https://doi.org/10.14505/jemt.v10.6\(38\).11](https://doi.org/10.14505/jemt.v10.6(38).11)
- Тоскина В. В. (2002). Эволюция архитектурно-планировочной структуры. На примере Акмолинской области: автореф. дис....канд. техн. наук. – Новосибирск, 28 с. // Toskina V.V. (2002). *Evolyuciya arhitekturno-planirovochnoj struktury. Na primere Akmolinskoj oblasti: avtoref. dis....kand. tekhn. nauk.* – Novosibirsk, 28 s.
- Abdrassilova G., Danibekova E., Tuyakayeva A., Syzdykova A. (2024). Architecture of Almaty in the 20th century: in search of cultural identity // *QazBSQA Хабаршысы, Сәулет.* – 4(94). – С. 8-23, <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.4-01>
- Юдина А.О. (2019). Исследование по благоустройству территорий для привлечения в ТРЦ / А.О. Юдина // Студенческие дни науки в ТГУ: научно-практ. конф. (Тольятти, 1-30 апреля 2019 года): сб. студ. работ / отв. за вып. С.Х. Петерайтис. – Тольятти : Изд-во ТГУ. // Yudina A.O. (2019). *Issledovanie po blagoustroystvu territorij dlya privlecheniya v TRC / A.O. Yudina* // *Studencheskie dni nauki v TGU: nauchno-prakt. Konf. (Tol'yatti, 1-30 aprelya 2019 goda): sb. stud. rabot / otv.za vyp. S.H. Peterajtis.* – Tol'yatti : Izd-vo TGU.
- Luis Alfonso Escudero-Gómez.(2024). Shopping centers challenging decline: Competitive strategies in three case studies from Madrid's urban area // *Journal of Retailing and Consumer Services* 79(3):103826, (2024), DOI:10.1016/j.jretconser.2024.103826
- Lian, H., Li, G., (2023). Correlation analysis of retail space and shopping behavior in a commercial street based on space syntax: a case of shijiazhuang, China // *Buildings* 13 (11), 2674,2-32 (2023), <https://doi.org/10.3390/buildings13112674>
- H. Lian, X. Li, W. Zhou et al. (2025) Pedestrian vitality characteristics in pedestrianized commercial streets-considering temporal, spatial, and built environment factors // *Frontiers of Architectural Research*,14, 630-653 (2025), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.10.006>
- СП РК 3.01-101-2013 (2024). Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских населенных пунктов» (изм.07.06.2024) // SP RK 3.01-101-2013 (2024). *Gradostroitel'stvo. Planirovka i zastrojka gorodskih i sel'skih naselennyh punktov*» (izm.07.06.2024)
- СП РК 3.02-122-2012 (2018). Предприятия розничной торговли» (изм.07.08.18_175-НК) // SP RK 3.02-122-2012 (2018). *Predpriyatiya roznichnoj trgovli*» (izm.07.08.18_175-NK)
- Численность населения Республики Казахстан по отдельным этносам на начало 2023 года. (2023). Комитет по статистике Министерства национальной экономики Республики Казахстан // *Chislennost' naseleniya Respubliki Kazahstan po otdel'nym etnosam na nachalo 2023 goda.* (2023). *Komitet po statistike Ministerstva nacional'noj ekonomiki Respubliki Kazahstan.*, <https://stat.gov.kz/>

Information about authors

Sarsembayeva Dinara Yerzhanovna – Doctor PhD in the specialty "Architecture", L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan. E-mail:dinara5431@mail.ru, ORCID:0000-0002-4558-0876, +7 7015535179

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_259
IRSTI 52.47.23

G.Z. Seitenova¹, A.G. Syzdyk¹, R.M. Dyussova², M.Z. Konkanov¹, A.E. Dzheksembaeva¹

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana c., Kazakhstan

E-mail: ayazhanka.syzdyk@gmail.com*

E-mail: gainiseitenova@gmail.com

E-mail: marcon@metrology.kz

E-mail: dzheksembaeva_ae@mail.ru

²NPJSC «Toraigrov University», Pavlodar c., Kazakhstan

E-mail: riza92@bk.ru

STUDY OF AGING PROCESSES OF DOMESTIC ADDITIVES FOR THE PREPARATION OF POLYMER BITUMEN

ПОЛИМЕР БИТУМЫН ДАЙЫНДАУҒА АРНАЛҒАН ОТАНДЫҚ ҚОСПАЛАРДЫҢ ТОЗУ ПРОЦЕСТЕРІН ЗЕРТТЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ДОБАВОК ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРБИТУМА

Abstract. In this article, the aging process of domestic polymer additives used to produce polymer-bitumen binders (PBB) materials was investigated. The importance of studying aging was due to the need to increase the durability of road surfaces exposed to significant temperature and mechanical loads during operation. The RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) method, model 20-25720, was used in the work to simulate accelerated aging of PBB. The study examined various formulations using two grades of polypropylene, applied in an amount of 4%. The choice of this formulation is justified by the fact that the obtained physical and chemical characteristics meet the requirements of the standards ST RK 1126 and ST RK 1227 for polymer-modified bitumen (PMB). The final product received the BMP grade, which confirms its compliance with regulatory requirements and suitability for use in road construction. Analysis of the data obtained showed that polymer additives had a significant effect on the resistance of bitumen to aging. In particular, changes in the structure and properties of PBB materials were identified, indicating an increase in their resistance to thermal aging. The results of this study provided valuable data for further improvement of PBB formulations aimed at increasing the service life and reliability of road surfaces.

Keywords: Bitumen, polypropylene, aging process, imitation, polymer additives, polymer-bitumen binders.

Аңдатпа. Бұл мақалада полимер-битум байланыстырығыш (ПББ) материалдарын өндіру үшін қолданылатын отандық полимерлі қоспалардың тозу процесі қарастырылды. Тозуды зерттеудің маңыздылығы пайдалану кезінде айтарлықтай температуралық және механикалық жүктеме-лерге ұшыраған жол төсемдерінің беріктігін арттыру қажеттілігіне байланысты болды. 20-25720 үлгісі RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) әдісі ПББ жылдам тозу модельдеу үшін пайдаланылды. Зерттеу 4 % мөлшерінде қолданылатын екі сортты полипропиленді пайдалана отырып, өртүрлі құрамдарды зерттеді. Бұл тұжырымды таңдау алынған физикалық-химиялық сипаттамалардың полимерлі модификацияланған битумға (ПМБ) арналған ҚР СТ 1126 және ҚР СТ 1227 стандарттарының талаптарына сәйкес келуімен негізделген. Соңғы өнім BMP маркасын алды, бұл оның нормативтік талаптарға сәйкестігін және жол құрылысында пайдалануға жарамдылығын растайды. Атап айтқанда, ПББ материалдарының құрылымы мен қасиеттерінде өзгерістер анықталды, бұл олардың термиялық тозуға төзімділігінің жоғарылауын көрсетті. Бұл зерттеудің нәтижелері жол төсемдерінің қызмет ету мерзімі мен сенімділігін арттыруға бағытталған ПББ тұжырымдарын одан әрі жетілдіру үшін құнды деректер береді.

Түйін сөздер: Битум, полипропилен, тозу процесі, имитация, полимерлі қоспалар, полимер-битум байланыстырығыштар.

Аннотация. В данной статье был исследован процесс старения отечественных полимерных добавок, применяемых для производства полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) материалов. Важность изучения старения была обусловлена необходимостью повышения долговечности дорожных покрытий, подвергающихся значительным температурным и механическим нагрузкам в процессе эксплуатации. В работе был применен метод RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), модель 20-25720, для имитации ускоренного старения ПБВ. В исследовании были изучены различные рецептуры с использованием двух марок полипропилена, применяемых в количестве 4%. Выбор данного рецепта обоснован тем, что полученные физико-химические характеристики соответствуют требованиям стандартов СТ РК 1126 и СТ РК 1227 для полимер-модифицированных битумов (ПМБ). Итоговый продукт получил марку БМП, что подтверждает его соответствие нормативным требованиям и пригодность для применения в дорожном строительстве. Анализ полученных данных показал, что полимерные добавки оказали значительное влияние на устойчивость битума к старению. В частности, были выявлены изменения в структуре и свойствах ПБВ материалов, которые свидетельствовали о повышении их сопротивляемости термическому старению. Результаты данного исследования предоставили ценные данные для дальнейшего улучшения рецептур ПБВ, направленных на увеличение срока службы и надежности дорожных покрытий.

Ключевые слова: Битум, полипропилен, процесс старения, имитация, полимерные добавки, полимерно-битумные вяжущие материалы.

Introduction. Polymer aging is one of the key factors affecting the performance characteristics of polymer additives in the production of polymer bitumen. Modern building materials, in particular polymer bitumen, must have high strength and durability properties, which requires a deep understanding of the aging and degradation processes of the additives used. In this context, the study of domestic polymer additives, their resistance to aging and interaction with bitumen is an urgent task that contributes to the development of high-quality polymer bitumen production technologies (Yang et al., 2024). The purpose of this study is to identify the aging processes of domestic polymer additives and assess their impact on the properties of polymer bitumen. The purpose of the work is to analyze changes in the physical and chemical properties of additives during aging, as well as to study the mechanisms of their interaction with bitumen. An important aspect of the study is to determine the service life of additives under operating conditions, which will increase the reliability and durability of PBB materials. Based on the above, we can formulate the hypothesis of the study: polymer additives resistant to aging will significantly improve the performance characteristics of polymer bitumen, ensuring their durability and reliability under various climatic and operational factors.

The objectives of the study include:

1. Study of existing data on the aging processes of polymers and their effect on the properties of PBB materials.
2. Conducting experimental studies to assess the properties of domestic additives in PBB compositions under various aging conditions.
3. Determining the optimal conditions for storing and using polymers to increase their service life and preserve their properties.

As a result of this study, new knowledge was obtained about the aging processes of polymer additives, which contributed to the development of more efficient technologies for the production of PBB materials and improving their quality.

Literature review. In recent decades, the demand for transport has increased significantly, and road infrastructure is facing challenges associated with increasing traffic. To address these challenges, several technologies have been developed to improve the performance of materials used in road construction. In particular, polymer modification of bitumen binders is not new, but one of the most successful technologies created to improve the properties of asphalt concrete mixtures (Yildirim, 2007; Lucena et al., 2004).

Bitumen is a hydrocarbon product obtained by refining crude oil by removing lighter fractions such as liquefied petroleum gas, gasoline, and diesel fuel (Lesueur, 2009). This material is widely used in construction due to its water-repellent and thermoplastic properties. Although bitumen is used for roofing, sealing, and insulation, its main use is in roads and hard surfaces, which account for about 85 % of total bitumen consumption (Lu and Isacson, 2002).

Polymers are macromolecules consisting of long chains synthesized from small monomers through chemical reactions. Among the polymers used as modifiers, elastomers and plastomers are the most common. Polymer-modified bitumens (PMB) are obtained by mechanical mixing or chemical reactions of bitumen with one or more polymers in an amount usually amounting to 3% to 10% by weight of the bitumen (Joohari & Giustozzi, 2020). In the case of mechanical mixing, such mixtures are called simple, since chemical reactions between the bitumen and the polymer do not occur, and the polymer acts as a filler that imparts special properties to the mixture. In the case of chemical reactions, the mixtures are called complex, since interaction occurs between the components (Boutevin, Pietrasanta and Robin, 1989).

The quality of the modification is determined by the ability of the polymer to improve the performance characteristics of the bitumen when added in small quantities. Polymer modification, in particular, is intended to increase the rigidity and elasticity of bitumen at high temperatures, reduce its temperature sensitivity, improve the workability of the mixture and reduce the rigidity of the material at medium and low temperatures (Karmakar & Roy, 2021). In addition, polymer-modified bitumens must be stable during storage and resistant to aging (Bahia and Perdomo, 1996).

One of the most important factors affecting this material is aging, as it is associated with the most common defects of bitumen mixtures, which are widely used in road construction. The tendency of bitumen to aging has been known since its use in the road industry (Sun, Wang and Zhang, 2014; Sarang et al., 2015). The aging process of the binder includes the loss of volatile components, as well as oxidative and polymer reactions that change its composition and physicochemical properties. These changes lead to an increase in the viscosity and rigidity of the bitumen, which causes its hardening and reduced adhesion (Apeagyei, 2011; Wu et al., 2009; Maharaj et al., 2018).

Due to chemical changes in the colloidal structure of bitumen, bitumen mixtures also suffer, which can lead to problems such as particle delamination, deterioration in adhesion, reduced fatigue strength and an increased likelihood of thermal cracks (Yan, Huang and Tang, 2017). However, many studies focus on specific materials or technologies, making it difficult to identify all the possibilities for studying ageing phenomena considering short- and long-term bitumen performance and their impact on the durability of road surfaces.

Therefore, this paper provides a technical overview of the various studies concerning the ageing processes of PMB materials. The types of ageing and the factors influencing this process are considered, and how other mixture components and the use of polymer-modified binders can change the ageing dynamics are examined. An analysis of the most frequently studied anti-ageing additives and their impact is presented.

Materials and research methods. The following materials were used to conduct the research:

1. Bitumen grade BND 100/130, provided by «Pavlodar Oil Chemistry Refinery» LLP (Kazakhstan). Bitumen of this grade is characterized by high viscosity and is widely used for the production of road surfaces, possessing the necessary characteristics for operation in various climatic conditions. The main physical and chemical properties of bitumen BND 100/130 are presented in Table 1 below.

Table 1. Characteristics of road bitumen 100/130

Bitumen properties	Results
Penetration (25°C, 100 gr, 5 sec, 0.1 mm)	111
Softening temperature according to RaB (°C)	46
Stretchability at 25 °C, cm	121
Fraass brittleness temperature, °C	-26
Solubility, %	99.98
Paraffin content, %	1
Change in mass after heating, %	0.1
Change in softening temperature, °C	5
<i>Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)</i>	

2. Polypropylene grade PP H350 and PP H030 «Company Neftekhim LTD» LLP produces polypropylene according to the National Standard of the Republic of Kazakhstan ST RK 3191-2018. The material has improved the strength and performance characteristics of PBB materials, such as crack resistance, elasticity and durability. Polypropylene (PP) is a thermoplastic material based on propylene (propene). The physical and mechanical characteristics of PP H350 and PP H030 are presented in Table 2.

Table 2. Characteristics of polypropylene

Polypropylene brand	PP H350	PP H030
Melt flow rate, g/10min	36.7	3.3
Scatter the yield indicator values within the party, %, no more than	8.4	4.6
The modulus of elasticity in bending, MPa, no less	1083	1187
Mass fraction of volatile substances, %, no more than	0.04	0.04
Tensile yield strength, MPa, no less	30.4	33
Elongation at yield point, %, no less	10	11
Cranule size, mm	4.3	4.3
The intensity of the smell, point, no more than	1	1
<i>Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)</i>		

3. Heavy vacuum gas oil of the H603 brand, provided by «Pavlodar Oil Chemistry Refinery» LLP, was used to adjust the viscosity of the PBB mixture and improve its technological characteristics. The addition of gas oil contributed to the improvement of the material fluidity and also ensured uniform distribution of the components in the mixture. This made it possible to achieve an optimal ratio of viscosity and plasticity, which is especially important for ensuring the durability and stability of the material during operation under road surface conditions. The main physical and chemical properties of heavy vacuum gas oil are shown in Table 3.

Table 3. Characteristics of heavy vacuum gas oil

Density at 20°C, kg/m ³	905
Coking ability, % by weight.	0.3
Mass fraction of sulfur, % by weight	2
<i>Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)</i>	

The following methods were used to conduct the research:

1. To evaluate the aging processes of PBB materials, a RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test), model 20-25720, was used. The method simulates accelerated aging of materials under the influence of temperature and oxidation processes, bringing laboratory conditions closer to real processes occurring during the production and operation of road surfaces.

The testing process was as follows: PBB mixture samples were placed in a thin layer in glass cylinders, which rotated inside the oven at a temperature of 163°C for 75 minutes. During the test, hot air was continuously supplied to the working chamber, which contributed to the active oxidation of the bitumen mixture. After the tests, the samples were analyzed for changes in the main characteristics, including viscosity, weight loss and elasticity.

This method made it possible to objectively evaluate the resistance of PBB materials to thermal aging and identify key changes occurring in the structure and properties of the mixture during operation.

The RTFOT test rig for aging PBB materials is designed to perform tests according to CT PK 1224-2003 with accelerated aging of bitumen by measuring the mass loss under the influence of high temperature. Up to 8 samples of PBB mixture (placed in glass vessels) rotate inside the drum at a temperature of 163°C at a speed of 15 rpm. At the same time, an air flow of 4000 ml/min is supplied to the samples. As a result, the fractional composition of the PBB mixture changes, which determines the process of its aging. The RTFOT rig is equipped with a door with a viewing window, a temperature regulator with the ability to maintain a given mode, a fan and a control thermometer.

The change in mass of a sample after aging is determined as a percentage change in mass using the following formula:

$$\Delta = \frac{M_1 - M_2}{M_1 - M_0} \cdot 100\%$$

where: Δ – change in mass of sample in jar after aging, %;

M_0 – mass of glass jar, g;

M_1 – mass of glass jar with bitumen before aging, g;

M_2 – mass of glass jar with bitumen after aging, g.

Eight samples were used for measurements. Two samples were used for calculations. The results of the mass change of these samples should not differ from each other by more than 0.2%. This requirement allows to minimize errors and guarantee the reliability of the results when analyzing the resistance of PBB materials to aging.

2. Needle penetration depth at a temperature of 25°C: To assess the depth of needle penetration at a temperature of 25°C (no less than 0.1 mm), tests were carried out in accordance with ST RK 1226-2003 using an automatic digital penetrometer from Infratest, model 20-20670.

The testing process was as follows: samples of the PBB mixture are placed in a special container, where they are cooled to a temperature of 25°C. After reaching the required temperature, a needle with a given load (usually 100 g) is slowly lowered onto the surface of the sample. The depth of penetration of the needle is measured in millimeters and recorded. This method allows for an objective assessment of the viscosity of PBB materials and their suitability for various operating conditions.

3. Ring and ball softening temperature: To determine the softening temperature using the ring and ball method (°C, not lower), an automated Infratest device was used, which complies with the standards of ST RK 1227-2003.

The testing process was as follows: samples of the PBB mixture were preheated to remove moisture to a temperature 80-100°C above the expected softening temperature, but not lower than 120°C and not higher than 180°C. The dehydrated PBB material was filtered and thoroughly mixed to remove air bubbles, after which it was poured in excess into two rings.

After cooling under ambient conditions, the excess PBB material was cut off with a heated knife.

Rings with PBB material and steel balls cooled to $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$ were placed in a water bath at the same temperature. The water temperature increased at a rate of $(5.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ per minute. The test continued until the ball was immersed in the PBB material and touched the lower plate, recording the softening temperature of the material. Strict adherence to the heating rate ensured the accuracy of the test.

Results and discussion. The composition of the studied PBB mixture includes bitumen grade BND 100/130, polypropylene grade H030 or H350, as well as vacuum gas oil in concentrations of 0.3%, 2.5% and 4%. The detailed formulations of the PBB mixture samples are presented in Table 4.

Table 4. Composition of PBB mixture samples

Bitumen BND 100/130	95.4 %	93.5%	92%
PP H030 / PP H350	4%	4%	4%
Vacuum gas oil	0.3%	2.5%	4%
<i>Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)</i>			

The figures show the results of tests of PBB materials using 4% concentrations of polypropylene (PP H030 and PP H350) and different concentrations of heavy vacuum gas oil. The tests were conducted to evaluate the softening point (by the Ring and Ball method) and the depth of needle penetration at a temperature of 25°C before and after aging by the RTFOT method.

The Figure 1 shows the results of the softening temperature change for PP H030 before and after aging: the softening temperature before aging was 65°C at the minimum gas oil concentration (0.3%) and gradually decreased to 61.8°C at the maximum gas oil concentration (4%). After aging, an increase in the softening temperature is observed for all concentrations, which may indicate an increase in the hardness of the mixture after aging. For example, at a gas oil concentration of 0.3%, the softening temperature increased from 65°C to 72.8°C , and at 4% - from 61.8°C to 66.2°C .

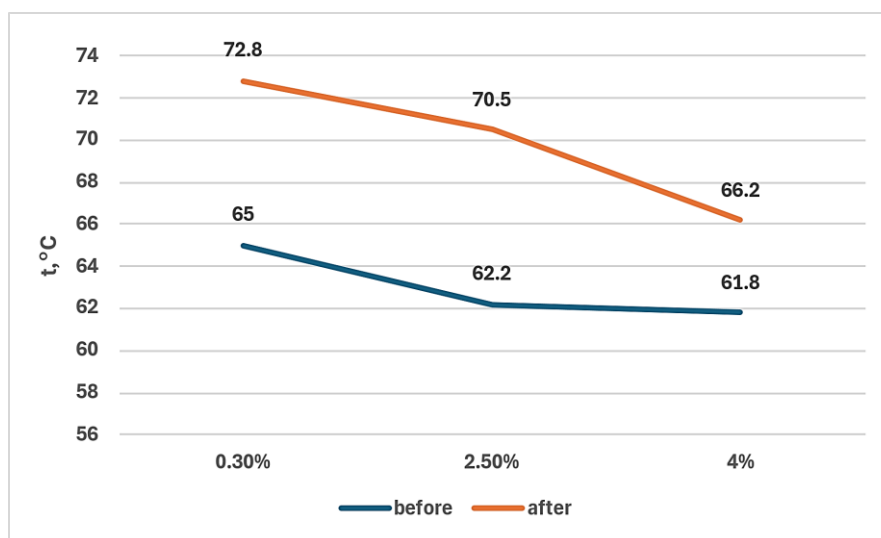


Figure 1. Softening temperature of PBB materials before and after aging

Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)

Thus, aging affects the change in the temperature characteristics of PBB materials, which must be taken into account when analyzing their thermal stability.

The Figure 2 shows the softening temperature change results for PP H350 before and after aging:

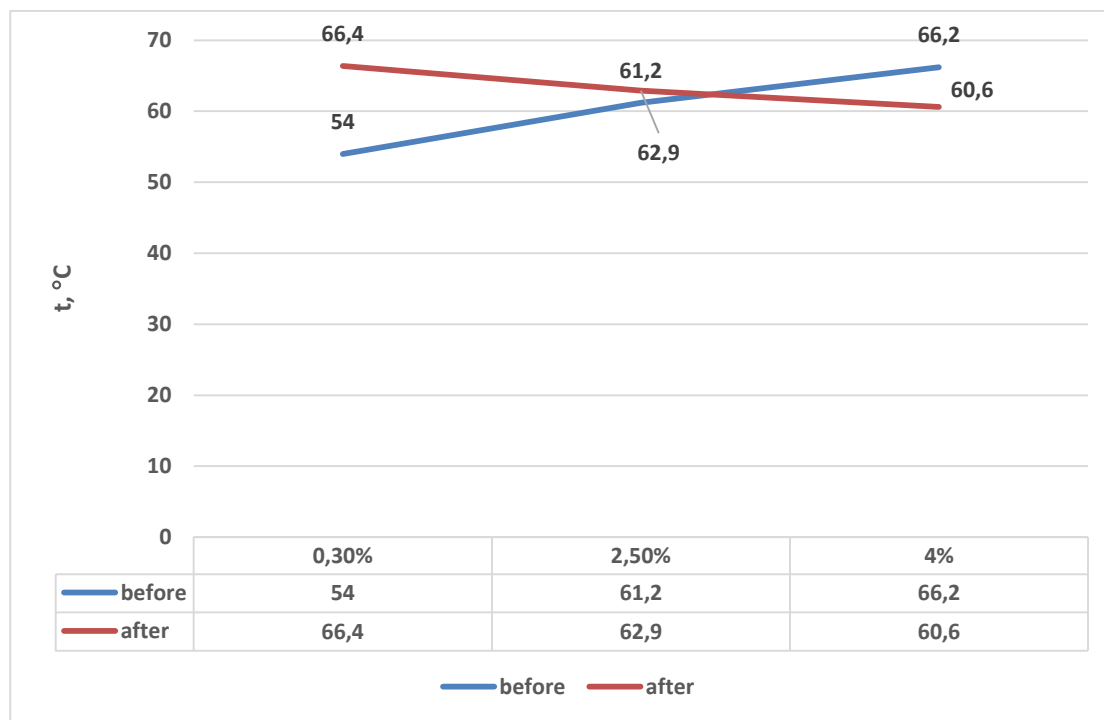


Figure 2. Softening temperature of PBB materials before and after aging

Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)

Polypropylenes (PP H030 and PP H350) show different reactions to the addition of gas oil and the aging process. For PP H030, the addition of gas oil leads to a decrease in the softening temperature before aging, but after aging, the softening temperature increases significantly, indicating its resistance to thermal aging. At the same time, for PP H350, a decrease in the softening temperature before aging is also observed, but after aging, the softening temperature decreases, indicating lower resistance to aging compared with PP H030.

The following two figures show the results of measuring the depth of needle penetration into PBB materials before and after aging.

The Figure 3 shows the results of the needle penetration depth for polypropylene H030 before and after aging. Before aging, the needle penetration depth varied from 39.6 mm at the minimum gas oil concentration (0.3%) to 54.5 mm at the maximum concentration (4%). This indicates an increase in the plasticity of the material with an increase in the gas oil content. After aging, the needle penetration depth decreased for all concentrations, indicating an increase in the rigidity of the PBB mixture after thermal aging. For example, at a concentration of 0.3%, the penetration depth decreased from 39.6 mm to 40 mm, and at 4% - from 54.5 mm to 36.35 mm.

Thus, it can be concluded that aging makes the PBB mixture harder, especially at high gas oil content, which is evident from the significant decrease in penetration depth at 4%.

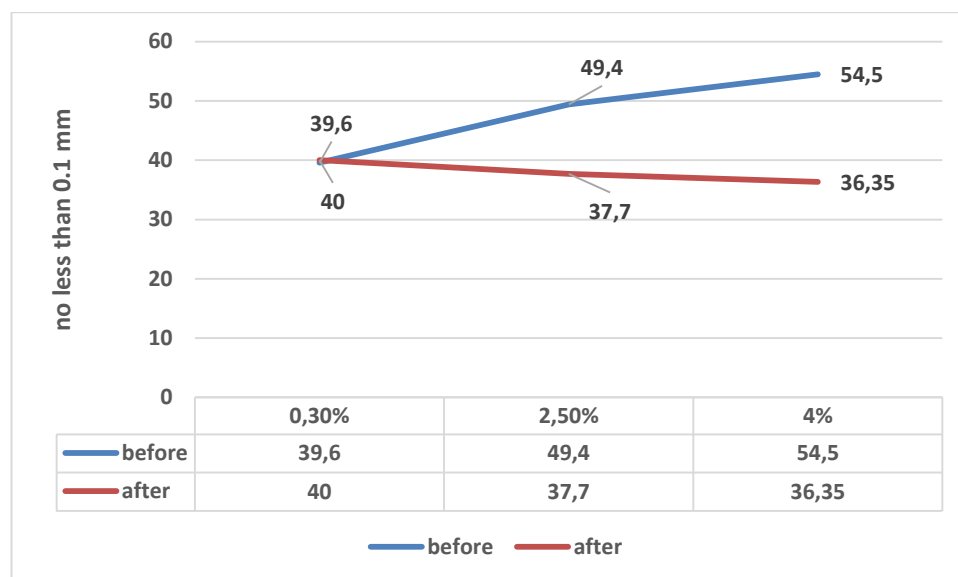


Figure 3. Needle penetration depth before and after aging

Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)

The Figure 4 shows the PP H350 needle penetration depth results before and after aging: before aging, the needle penetration depth varied from 35 mm at the minimum gas oil concentration (0.3%) to 42.9 mm at the maximum concentration (4%). An increase in the penetration depth is observed with increasing gas oil content, indicating an increase in the plasticity of the material. After aging, the needle penetration depth varied from 34.15 mm to 44.75 mm. This shows that after aging, the PBB mixture became more plastic, especially at the maximum gas oil concentration (4%), where the penetration depth increased from 42.9 mm to 44.75 mm.

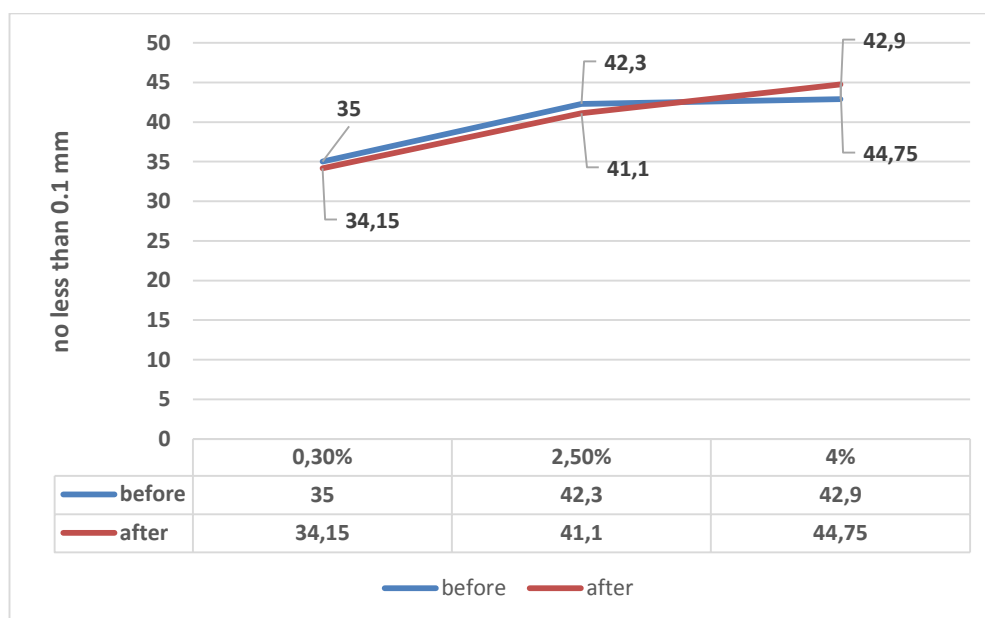


Figure 4. Needle penetration depth before and after aging

Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)

These results show that the addition of gas oil increases the plasticity of PBB materials before aging, which is confirmed by the increase in the depth of needle penetration with increasing gas oil content. However, after aging, the material becomes harder, as evidenced by a decrease in the depth of needle penetration for all gas oil concentrations. At the same time, polypropylene H030 demonstrates more pronounced changes in hardness after aging compared to polypropylene H350, which indicates its greater sensitivity to the aging process.

The results of experiments on bitumen oxidation at different concentrations of polypropylene with molecular weights of 30 and 350, combined with vacuum gas oil at a high temperature of 163 °C, are shown in Tables 5 and 6. These tables illustrate the changes in mass and consistency of the mixtures before and after the RTFOT procedure.

Table 5. Results of RTFOT oxidation at 163°C in the presence of polypropylene with a molecular weight of 30

№	4% polypropylene 30 and 0.3% vacuum gas oil			4% polypropylene 30 and 2.5% vacuum gas oil			4% polypropylene 30 and 4% vacuum gas oil		
	Mass before RTFOT, g	Mass after RTFOT, g	Change in mass, %	Mass before RTFOT, g	Mass after RTFOT, g	Change in mass, %	Mass before RTFOT, g	Mass after RTFOT, g	Change in mass, %
1	189.6	189	M ₁ -0.31	193.9	192.5	M ₁ -0.72	200.5	200.4	M ₁ -0.04
2	192.3	192	M ₂ -0.15	191.7	192	M ₂ -0.15	201.5	200.4	M ₂ -0.04

Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)

Table 6. Results of RTFOT oxidation at 163°C in the presence of polypropylene with a molecular weight of 350

№	4% polypropylene 350 and 0.3% vacuum gas oil			4% polypropylene 350 and 2.5% vacuum gas oil			4% polypropylene 350 and 4% vacuum gas oil		
	Mass before RTFOT, g	Mass after RTFOT, g	Change in mass, %	Mass before RTFOT, g	Mass after RTFOT, g	Change in mass, %	Mass before RTFOT, g	Mass after RTFOT, g	Change in mass, %
1	193.3	193.2	M ₁ -0.05	191.7	191.5	M ₁ -0.1	190.9	190.9	M ₁ -0
2	195	195	M ₂ -0	195	195	M ₂ -0	194.9	194.9	M ₂ -0

Note - compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)

PBB samples with a molecular weight of 350 are more resistant to aging compared to PBB samples with a molecular weight of 30.

A preliminary comparative economic analysis of the developed PBB compositions was carried out (Table 7). The cost estimation was based on average market prices for bitumen BND 100/130, polypropylene grades H030 and H350, and an approximate value for vacuum gas oil. The total cost of 1 ton of PBB mixture based on PP H350 was about 5 900 tenge higher than the mixture with PP H030. This is mainly due to the higher price of the H350 polymer. However, considering its better thermal aging resistance and potential to extend pavement service life, the use of PP H350 may be economically justified for long-term applications, especially in heavily loaded road segments.

Table 7. Comparative cost estimation of PBB mixtures with different polypropylene grades

Component	PP H030-based PBB (KZT/t)	PP H350-based PBB (KZT/t)
Bitumen BND 100/130 (95.5%)	114 000	114 000
Polypropylene (4%)	40 800	46 704
Gas oil (2.5%) estimated	5 000	5 000
Total cost per 1 ton of mix	159 800	165 704
<i>Note – Gas oil cost estimated based on open market data (approx. 200 KZT/t). Bitumen price averaged at 114.000 KZT/t.</i>		

The data presented in Table 8 reflect the results of statistical processing of the softening temperature, penetration depth, and mass change for bitumen samples of grade BND 100/130 with different gas oil concentrations (0.3%, 2.5%, and 4%). The bitumen samples were studied under two conditions: with PP H030 and PP H350 additives. For each gas oil concentration, the average values, standard deviations, and 95% confidence intervals were calculated.

Table 8. Static data processing

Parameters	Average softening point determination by the Ring and Ball method (°C, not lower)	Standard deviation, °C	Confidence interval (95%)	Average needle penetration depth at 25°C, mm	Standard deviation, mm	Confidence interval (95%)	Change in mass, %	Standard deviation, %	Confidence interval (95%)
PP H030	71.1	3.8	3.7	37.1	2.2	2.1	0.2	0.1	0.2
PP H350	68	10.6	10.4	41.4	5	4.9	0.04	0.01	0.01
<i>Note – compiled by the authors on the basis of (Seitenova, Syzdyk, Dyussova, Konkanov and Dzheksembaeva, 2025)</i>									

The analysis shows that both the softening point and the penetration depth are dependent on the gas oil concentration and the additive type (PP H030 or PP H350). Higher gas oil concentrations generally result in softer bitumen (higher penetration depth) and a lower softening point. The mass change values show that gas oil concentrations have a limited effect on the stability of the material, especially for PP H350, where the mass change remains quite low across the different concentrations. The confidence intervals (95%) show that the greatest variability in the results is observed at a gas oil concentration of 4%, especially for the softening point for PP H350.

The results show that the addition of gas oil and polypropylene to bitumen has a significant effect on its thermal stability and plasticity. Increasing the gas oil concentration reduces the softening temperature and increases the depth of needle penetration, indicating a softer material before aging. However, after aging, a decrease in the softening temperature and penetration depth is observed for all samples, indicating an increase in hardness and deterioration in the thermal stability of bitumen compositions.

The changes are particularly noticeable for PP H030. The reduction in softening temperatures and penetration depth for this polymer after aging indicates its lower resistance to

thermal effects compared to PP H350. In the case of PP H350, a decrease in penetration depth is also observed after aging, but its effect is less pronounced. This indicates that PP H350 demonstrates better resistance to aging and may be preferable for use in conditions requiring the preservation of material properties after long-term use.

The obtained results indicate that PBB compositions with the addition of polypropylene and gas oil undergo changes that can affect their performance characteristics, especially after aging. It is important to take these changes into account when developing and using polymer-modified bitumen materials to increase their durability and compliance with standards such as ST RK 1224-2003.

These results are important for understanding how different concentrations of polypropylene and gas oil affect the durability of PBB compositions. Such understanding may be useful in road construction and other applications of bitumen materials where strength, thermal stability and wear resistance of the material are key indicators.

Conclusions. The conducted studies have shown that the addition of polypropylene grades H030 and H350, as well as vacuum gas oil to bitumen has a significant effect on its physical and mechanical properties, both before and after aging. Before aging, a decrease in the softening temperature and an increase in the depth of penetration of the needle with an increase in the concentration of gas oil are observed, which indicates an increase in the plasticity of the material. However, after aging, a decrease in the softening temperature and a decrease in the depth of penetration occur, which indicates an increase in hardness and a deterioration in the thermal stability of the PBB material.

The changes in the properties of mixtures with polypropylene grade H030 are particularly noticeable, demonstrating more pronounced changes after aging compared to H350. This indicates that polymer additives have different effects on the resistance of materials to aging.

Depending on the climatic zones of the Republic of Kazakhstan, formulations with PP H350 are more suitable for hot, arid regions due to better thermal aging resistance, while PP H030 may be preferable for colder zones requiring enhanced initial plasticity. The results can also guide the selection of formulations for highways, where durability is critical, versus urban roads, where flexibility may be prioritized. Future studies will aim to assess the long-term durability of the developed PBB compositions, including resistance to fatigue cracking, UV and ozone aging, freeze-thaw cycles, and moisture susceptibility, to ensure comprehensive performance evaluation under real operating conditions. Thus, the results of the study confirm that polymer-modified bitumen compositions with the addition of vacuum gas oil require careful selection of components to ensure durability and thermal stability under operating conditions.

Mention the use/non-use of AI tools. When preparing this work, the authors did not use AI tools.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. This research has been/was/is funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR21882278 «Establishment of a construction and technical engineering centre to provide a full cycle of accredited services to the construction, road-building sector of the Republic of Kazakhstan»).

References

- Apeagyei, A. K. (2011). Laboratory evaluation of antioxidants for asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 25(1), 47–53. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.058>
- Bahia, H. U., & Perdomo, D. (1996). Current practices for modification of paving asphalts. *Preprints of Papers. American Chemical Society, Division of Fuel Chemistry*, 41(4). <https://www.osti.gov/biblio/430334>

- Boutevin, B., Pietrasanta, Y., & Robin, J. J. (1989). Bitumen-polymer blends for coatings applied to roads and public constructions. *Progress in Organic Coatings*, 17(3), 221–249. [https://doi.org/10.1016/0033-0655\(89\)80027-5](https://doi.org/10.1016/0033-0655(89)80027-5)
- Joohari, I. B., & Giustozzi, F. (2020). Chemical and high-temperature rheological properties of recycled plastics-polymer modified hybrid bitumen. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123064. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123064>
- Karmakar, S., & Roy, T. K. (2021). Influence of plastic waste on chemical and mechanical properties of modified bitumen used in the bituminous mix for flexible pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(2), 04020440. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003545](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003545)
- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2), 42–82. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>
- Lucena, M., Soares, S., & Soares, J. (2004). Characterization and thermal behavior of polymer-modified asphalt. *Materials Research*, 7(4), 529–534. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392004000400004>
- Lu, X., & Isacsson, U. (2002). Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. *Construction and Building Materials*, 16(1), 15–22. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00033-2)
- Maharaj, R., Maharaj, C., & Hosein, A. (2018). Performance of waste polymer modified road paving materials. *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, 34(1), 19–33. <https://doi.org/10.1177/147776061803400102>
- Sarang, G., Lekha, B. M., Krishna, G., & Ravi Shankar, A. U. (2015). Comparison of stone matrix asphalt mixtures with polymer-modified bitumen and shredded waste plastics. *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1124799>
- Sun, L., Wang, Y., & Zhang, Y. (2014). Aging mechanism and effective recycling ratio of SBS modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 70, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.064>
- Wu, S., Pang, L., Mo, L., Chen, Y., & Zhu, G. (2009). Influence of aging on the evolution of structure, morphology and rheology of base and SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 23(2), 1005–1010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.004>
- Yan, C., Huang, W., & Tang, N. (2017). Evaluation of the temperature effect on Rolling Thin Film Oven aging for polymer modified asphalt. *Construction and Building Materials*, 137, 485–493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.135>
- Yang, Q., Lin, J., Wang, X., Wang, D., Xie, N., & Shi, X. (2024). A review of polymer-modified asphalt binder: Modification mechanisms and mechanical properties. *Cleaner Materials*, 12, 100255. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100255>
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>

Information about authors

Seitenova Gaini – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Astana c., Kazakhstan, E-mail: gainiseitenova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6202-3951, +7 747 213 20 12

Syzdyk Ayazhan – master's student, «L.N. Gumilyov Eurasian National University», Faculty of Natural Sciences, Department of Chemistry, Astana c., Kazakhstan, E-mail: ayazhanka.syzdyk@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4435-0976, +7 705 491 76 31

Dyussova Rizagul – Candidate of Technical Sciences, postdoctoral fellow of NPJSC «Toraigyrov University», Pavlodar c., Kazakhstan, E-mail: riza92@bk.ru, ORCID: 0000-0003-3083-5255, +7 702 225 04 13

Konkanov Marat Zhumataevich – PhD, «L.N. Gumilyov Eurasian National University», c. Astana, Kazakhstan, E-mail: marcon@metrology.kz, ORCID: 0000-0003-3083-5255, +7 777 008 08 07

Dzheksembaeva Asel Ermekovna – PhD, director of the Innovation Development Department, KEJSC «L.N. Gumilev Eurasian National University», c. Astana, Kazakhstan, E-mail: dzheksembaeva_ae@mail.ru, ORCID: 0009-0001-3377-0250, +7 701 888 25 87

СӘУЛЕТ
АРХИТЕКТУРА
ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_271
MPHTI 67.07.01

А.Р. Серикова¹, Т.А. Иноземцева², Е.А. Феоктистова³

Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

¹E-mail: serikova.ainura111@gmail.com*

²E-mail: Veduga75@mail.ru

³E-mail: EFeoktistova@ektu.kz

ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ НА ТЕРРИТОРИИ СОВРЕМЕННОГО КАЗАХСТАНА

ҚАЗІРГІ ҚАЗАҚСТАН АУМАҒЫНДАҒЫ ӨНЕРКӘСІПТІК АРХИТЕКТУРАНЫҢ ДАМУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

INDUSTRIAL ARCHITECTURE DEVELOPMENT FEATURES IN MODERN KAZAKHSTAN

Аннотация. В статье представлен анализ развития промышленной архитектуры на территории современного Казахстана начиная с XVIII века и до настоящего времени. Цель работы – выявление закономерностей развития промышленной архитектуры на территории Казахстана, анализ её исторических этапов и определение факторов, влияющих на её трансформацию. Актуальность исследования обусловлена быстрым развитием промышленности в Казахстане и необходимостью адаптации архитектуры промышленных объектов к современным требованиям. Практическая значимость заключается в возможности применения полученных данных для оптимизации проектирования промышленных объектов с учётом устойчивого развития и интеграции в городскую среду. Исследование основано на методах архитектуроведческого анализа в комплексе с историко-аналитическим методом, типологической и сравнительной оценкой объектов и явлений. Рассматриваются предпосылки и основные этапы формирования и трансформации архитектуры, начиная со становления первых производственных объектов до возведения промышленных комплексов в современное время. Установлено, что разнообразие и богатство природных ресурсов, социально-экономическое развитие общества, формирование специализированных поселений, адаптация архитектурных решений к изменениям в производственных технологиях и процессах стали важными предпосылками эволюции промышленных объектов. В исследовании выделены четыре основных периода развития промышленной архитектуры на территории Казахстана, рассмотрены ее наиболее характерные особенности в каждый исторический период, а также выявлены тенденции в трансформации индустриальной застройки городов в настоящее время. Определено, что развитие промышленной архитектуры в настоящее время в Казахстане происходит за счёт активного внедрения инновационных и цифровых технологий, автоматизации и устойчивых подходов, способствуя формированию экологических, функциональных и адаптивных объектов. Установлено, что ключевыми направлениями её совершенствования являются интеграция с городским пространством, модернизация инфраструктуры, повышение эффективности производственных процессов и создание комфортной рабочей среды.

Ключевые слова: промышленная архитектура Казахстана, история промышленных зданий, типология производственных объектов, интеграция архитектуры и инженерии, памятники промышленной архитектуры.

Аңдатпа. Мақалада қазіргі Қазақстан аумағындағы XVIII ғасырдан бастап бүгінгі күнге дейінгі өнеркәсіптік сәулет өнерінің дамуына талдау ұсынылған. Жұмыстың мақсаты – Қазақстан аумағындағы өнеркәсіптік сәулеттің даму заңдылықтарын айқындау, оның тарихи кезеңдерін талдау және трансформациясына өсер ететін факторларды анықтау. Зерттеудің өзектілігі Қазақстанда өнеркәсіптің жедел дамуына және өндірістік нысандар архитектурасын қазіргі талаптарға бейімдеу қажеттілігіне байланысты. Практикалық маңыздылығы – алынған деректерді өнеркәсіптік нысандарды жобалауды тұрақты даму қағидаттарын және қалалық

ортаға біріктіруді ескере отырып оңтайландыруда қолдану мүмкіндігінде. Зерттеу сәулеттанушылық талдау әдістері, тарихи-аналитикалық әдіс, типологиялық және салыстырмалы бағалау тәсілдері негізінде жүргізілді. Алғашқы өндірістік нысандардың қалыптасуынан бастап қазіргі заманғы өнеркәсіптік кешендердің салынуына дейінгі сәулет дамуының алғышарттары мен негізгі кезеңдері қарастырылған. Табиғи ресурстардың әртүрлілігі мен байлығы, қоғамның әлеуметтік-экономикалық дамуы, мамандандырылған елді мекендердің қалыптасуы, өндірістік технологиялар мен процестердегі өзгерістерге сәулеттік шешімдердің бейімделуі – өнеркәсіптік нысандардың эволюциясының маңызды алғышарттары ретінде анықталды. Зерттеу барысында Қазақстан аумағындағы өнеркәсіптік сәулеттің дамуындағы төрт негізгі кезең анықталып, әр тарихи кезеңдегі негізгі ерекшеліктері сипатталды, сондай-ақ қазіргі қалалардағы индустриялық құрылымның трансформациясындағы үрдістер айқындалды. Бүгінгі таңда Қазақстандағы өнеркәсіптік сәулет инновациялық және цифрлық технологияларды, автоматтандыру мен тұрақты тәсілдерді белсенді енгізу арқылы дамып жатқаны анықталды. Оның одан әрі жетілдірілуіндегі басты бағыттар – қалалық кеңістікпен бірігу, инфрақұрылымды жаңғырту, өндірістік процестердің тиімділігін арттыру және жайлы еңбек жағдайларын жасау.

Түйін сөздер: Қазақстанның өнеркәсіптік архитектурасы, өнеркәсіптік ғимараттардың тарихы, өндірістік нысандардың типологиясы, сәулет пен инженерияның интеграциясы, өнеркәсіптік мұра.

Abstract. The article presents an analysis of the development of industrial architecture in the territory of modern Kazakhstan, from the 18th century to the present day. The aim of the study is to identify the patterns of development of industrial architecture in Kazakhstan, analyze its historical stages, and determine the factors influencing its transformation. The relevance of the research lies in the rapid growth of industry in Kazakhstan and the need to adapt industrial architectural design to modern requirements. The practical significance is in the possibility of applying the obtained data to optimize the design of industrial facilities, taking into account the principles of sustainable development and integration into the urban environment. The research is based on architectural analysis methods combined with historical-analytical approaches, as well as typological and comparative assessments of objects and phenomena. It examines the preconditions and main stages of the formation and transformation of industrial architecture – from the emergence of the first production facilities to the construction of modern industrial complexes. It has been established that the diversity and richness of natural resources, socio-economic development, formation of specialized settlements, and adaptation of architectural solutions to technological changes are key preconditions for the evolution of industrial architecture. The study identifies four main periods in the development of industrial architecture in Kazakhstan, outlines their specific features in each historical stage, and highlights the current trends in the transformation of urban industrial areas. It is determined that today industrial architecture in Kazakhstan is developing through the active implementation of innovative and digital technologies, automation, and sustainable approaches, contributing to the creation of ecological, functional, and adaptive structures. The key directions of its further improvement are integration with urban space, infrastructure modernization, increased efficiency of production processes, and the creation of a comfortable working environment.

Keywords: industrial architecture of Kazakhstan, history of industrial buildings, typology of production facilities, integration of architecture and engineering, industrial heritage.

Введение. Промышленные здания и сооружения занимают важное место в архитектурной среде современных городов Казахстана. Они не только формируют обширные территории, но и активно влияют на визуальный облик и уникальный характер городской застройки, отражая взаимодействие промышленного прогресса с культурными и эстетическими традициями страны. Сохранившиеся исторические индустриальные объекты составляют значительную часть архитектурного наследия ряда городов. В частности, в Петропавловске «объекты промышленной архитектуры составляют 20 % от общего количества памятников» (Туякаева А.К., Огулева А.Д., 2022 г.), уцелели отдельные здания и сооружения в г. Семей, г. Павлодаре, г. Алматы и др. Для большинства городов именно развитие промышленности становилось основным импульсом для развития, а архитектура заводов, фабрик и комбинатов становилась «визитной» карточкой города.

Одним из стратегически значимых государственных приоритетов развития Республики Казахстан является наращивание индустриального потенциала страны. Этот

процесс напрямую связан с созданием инновационных производств, модернизацией существующих промышленных объектов и, как следствие, строительством новых промышленных зданий и сооружений. Поэтому в настоящее время, наряду с вопросами сохранения архитектурного наследия, приобретают актуальность вопросы разработки оптимальных подходов к гармоничному включению новых промышленных объектов в городскую среду с учетом функциональных, экологических, культурных и эстетических аспектов. Данная работа направлена на выполнение первого этапа исследования обозначенных вопросов, который заключается в выявлении особенностей развития промышленных объектов на территории современного Казахстана.

Исследование фокусируется на выявлении предпосылок развития промышленных зданий, установлении основных временных этапов их эволюции, определении наиболее характерных особенностей индустриальной архитектуры. Временные рамки исследования охватывают преимущественно период с начала XVIII века до настоящего времени. Историческая ретроспектива этого процесса помогает понять механизмы формирования производственных зданий, их особенности пространственной организации, а также возможные направления развития в будущем.

Материалы и методы исследования. Объект и цель исследования определили в качестве ведущих методы архитектуроведческого анализа, позволяющие не только систематизировать данные о генезисе и особенностях архитектуры, но и провести критическую оценку и интерпретацию. Историко-аналитический метод применялся для выявления объектов, а также при установлении исторической достоверности фактов и явлений путем сравнения и сопоставления данных из различных источников. Использованы научные статьи, монографии, учебные пособия и статистические данные.

Исследование промышленной архитектуры Казахстана основано на анализе ключевых источников для выявления закономерностей её исторического развития и современных тенденций. Следует отметить, что различные аспекты формирования промышленной архитектуры в целом, и на территории Казахстана в частности, рассматривались в трудах историков, социологов, археологов, градостроителей и архитекторов. Работы Б. Глаудтинова, К. Самойлова, С. Демидова, М. Глаудиновой, А. Туякаевой, Р. Чекаевой, Н. Рындиной, К. Джумагалиевой, М. Абсеметова, В. Зиновьева, в которых затрагиваются отдельные проблемы развития индустриальной застройки, были использованы для изучения эволюции промышленных объектов, типологических особенностей, их адаптации к технологическим изменениям и социальным факторам.

Результаты и их обсуждения. Зарождение промышленной архитектуры на территории Казахстана относится к эпохе бронзы. На обширной территории «евразийской металлургической провинции», в частности «на наиболее мощном Алакульском металлургическом комплексе» (Рындина Д.В., 2002), велась активная деятельность по добыче руды и металлопроизводству. В этот период здесь формируются обширные ареалы добычи полезных ископаемых и поселения при них. Природные ресурсы, особенно медь и олово, сыграли ключевую роль в становлении металлургии. Развитие металлургического производства стало не только базой для создания новых орудий труда, но и стимулом для социально-экономического развития общества. Первые горняки и «металлурги» первоначально приспособляли для производственного процесса различные природные локации (гrotы, пещеры), впоследствии строили печи и даже возводили плотины, как в археологическом комплексе Ата-су. Впоследствии местоположение месторождений полезных ископаемых станет одной из важнейших предпосылок основания поселений.

Металлургическая деятельность, зародившаяся в эпоху бронзы, вплоть до XVIII века развивалась с переменной интенсивностью. От эпохи средневековой городской цивилизации юга Казахстана сохранились археологические останки гончарных и кузнечных

мастерских. Исторические перипетии обусловили в дальнейшем преимущественно кочевой образ жизни большей части населения Казахстана, и поступательное развитие производственных объектов было прервано. Непосредственное строительство производственных зданий и их интеграция в структуру поселений начнется лишь с середины XVIII века, отражая изменения в социально-экономическом развитии Казахстана. Поэтому объединим большой по времени отрезок в один исторический период – *период формирования сырьевой промышленной базы* – выделим предпосылки для его развития:

- социальные, обусловленные общественным разделением труда, миграционными процессами на территорию племен с технологическими знаниями и навыками, что способствовало освоению природных ресурсов, развитию ремесла и производству эффективных для того времени орудий;

- экономические, связанные с богатыми, легкодоступными месторождениями металлов, древесины и других природных ресурсов, определивших формирование первых промышленных объектов, связанных с их добычей и обработкой. Наличие залежей меди, олова и других металлов стало ключевым фактором формирования ранних промышленных зон;

- территориально-административные, определившие ареалы распространения центров металлургии и связи между производственными регионами, а также опорные оседлые поселения с развитыми ремесленными и административными функциями.

Эти предпосылки послужили отправной точкой для последующего индустриального развития Казахстана и промышленной архитектуры, последовательно отражая процессы трансформации и модернизации страны в каждый последующий исторический период.

Казахстан в начале XVIII века, практически не имея промышленности, являлся перспективным рынком сбыта, стратегически важной территорией и богатым источником природных ресурсов. Развитое скотоводство, полезные ископаемые стали не только объектом торговли, но и основой для развития соответствующих промышленных отраслей, чему во многом способствовало градостроительное развитие страны. В середине XVIII века появляются кожевенное производство, мукомольная и солевая промышленность. Простота трудовых процессов и малочисленность «предприятий» не требовали в то время помещений со специализированными планировочными параметрами и принципами организации пространства. Хозяйственные постройки, создаваемые народными умельцами в традициях вернакулярной архитектуры, стали первыми «прообразами» промышленных объектов.

Огромное значение в экономике региона имел соляной промысел, который не только приносил «государству и казне немалую прибыль» (Джумагалиева К.В., 2010) за счет вывоза и торговли, но и использовался в кожевенном производстве, а также в бытовых целях местного населения. Примечательно, что Коряковский форпост (рис. 1) – будущий г. Павлодар, был основан в 1720 году на Иртышской линии укреплений недалеко от одноименного озера, где велась добыча соли. На территории форпоста, помимо обычных строений, находились солевой амбар и дом поставщика соли (Glaudinova M.B., Glaudinov B., Galimzhanova A.S., 2019).

Окончательное закрепление современных территорий Казахстана в составе Российской империи к 70-м годам XIX века, а также активная переселенческая политика государства, поддерживаемая различными льготами для населения и купечества, развитие транспортной инфраструктуры (тракты, водное сообщение и прокладка железных дорог) способствовали росту поселений и формированию преимущественно перерабатывающих отраслей производства. В городах, часто на прибрежных территориях, появлялись кожевенные, шерстомойные, салотопенные, мыловаренные, свечные, винокуренные и пивоваренные заводы, маслобойни, водяные, ветровые (рис. 2) и паровые (первая

механизированная была построена в г. Семее, 1900 г.) мукомольные мельницы, а также склады (рис. 2). Возрастающая потребность в строительных материалах стимулировала развитие лесопилок и кирпичных заводиков. Формирующаяся инженерная инфраструктура городов обусловила появление локомотивного депо, водокачки, водонапорных башен, первых электростанций (Туякаева А.К., Огулева А.Д., 2022), речных доков с ремонтными мастерскими. В числе уникальных производств стоит отметить сантонинный завод в г. Чимкенте, который был построен и запущен купцом Н. Ивановым в 1885 году. Чимкентским сантонином – медицинским препаратом на основе цитварной полыни – снабжались Германия, Япония, Северная Америка. И это предприятие положило начало одной из крупнейших современных фармацевтических компаний SANTO АО «ХИМФАРМ».

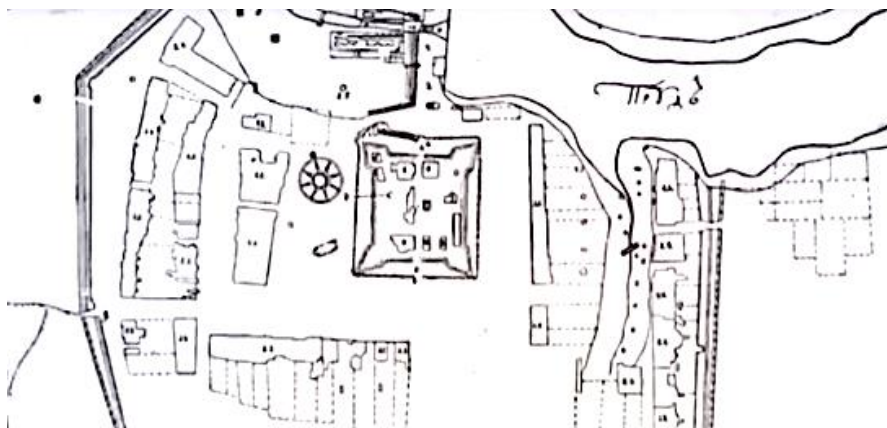


Рисунок 1. Общий план Коряковского форпоста и образовавшегося при нем поселка (1765 г.)
Примечание – (фото «Городской портал Павлодара», 2021)



а



б

Рисунок 2. Примеры производственных объектов конца XIX – начала XX вв:

а – внутренний вид двора Павлодарского склада, конец XIX – начало XX в.;

б – ветряная мельница, Северный Казахстан, конец XIX в.

Примечание – (фото «Большой атлас истории и культуры Казахстана», с. 487, 498)

Набирающее обороты индустриальное развитие городов Казахстана в 20-х годах XX века было приостановлено крахом Российской империи, что привело к социально-экономическим потрясениям во всех сферах. Таким образом, выделим второй период развития промышленной архитектуры – *период начала формирования индустриальной среды городов, датируемый серединой XVIII в. – 20-е годы XX вв.*

Промышленная застройка в городах Казахстана второго периода характеризуется наличием общих черт:

- преимущественным использованием кирпича и доминированием «кирпичного сибирского стиля», характерного для архитектуры городов юга Западной Сибири и Казахстана данной эпохи. Включение элементов готики, неоклассицизма в целом свидетельствует об эклектике;

- геометричностью четкой структуры объемно-планировочного решения здания, сложность и габариты которого определялись емкостью, функционалом и технологическим процессом объекта. Так, например, мельница Мазаева в г. Петропавловске в связи с особенностями производства имела «все три этажа разной высоты» (*Чекаева Р.У., Ревтова В.В., 2017*);

- лаконичностью и сдержанностью использования элементов архитектурного декора в организации фасадов зданий, в частности: декоративные ступенчатые карнизы, лучковые перемиčky, сандрики, пилястры;

- возведением более крупных объектов в городах-центрах губерний. В частности, сохранились здания пятиэтажных мельниц в г. Петропавловске (мельница Муратова, 1905 г.) и г. Семее (мельница братьев Мусиных, 1890 г.), шестиэтажной мельницы в г. Уральске (мельница купца Макарова, 1903 г.). Производственные здания в малых городах строились преимущественно в один-два этажа.



а



б

Рисунок 3. Промышленные здания конца XIX века – начала XX века: а – пивоваренный завод купца Лореца, г. Костанай; б – склады купца Хусаина Бегишева, г. Астана

Примечание – а) фото rutraveller, 2013; б) фото Турара Казанганова, 2022

В 20-е годы XX века в СССР началась модернизация экономики, инициирующая приток промышленных мигрантов, в результате чего «процесс индустриализации Казахстана приобрел необратимый характер и получил прочный фундамент» (*Абсембетов М.О., Зиновьев В.П., 2016*). Из аграрного региона Казахстан за годы предвоенных пятилеток трансформировался в крупнейший центр тяжелой промышленности с постепенно ускоряющейся урбанизацией.

Великая Отечественная война активизировала процессы индустриализации и урбанизации вследствие эвакуации промышленных предприятий и научно-производственных кадров для создания оборонной промышленности. Помимо около 220-ти передислоцированных промобъектов, за годы войны «было построено 460 заводов,

фабрик, рудников, шахт и отдельных производств» (Абсембетов М.О., Зиновьев В.П., 2016). Сформировавшаяся в итоге многоотраслевая промышленность Казахстана стала одной из опорных баз в восстановлении пострадавших от войны районов. Промышленные предприятия переключились на выпуск мирной продукции. Строились предприятия тяжелой индустрии, шло ускоренное развитие черной и цветной металлургии, легкой и пищевой отрасли производства, нефтяной и газовой, химической и нефтехимической промышленности, электроэнергетики и машиностроения.

Поэтому в этот период типология объектов охватывала практически все отрасли промышленности, которые включали заводы, комбинаты, цехи, фабрики, инженерные сооружения (нефтебаки, резервуары, газгольдеры, эстакады, пешеходные и технические галереи, мачты, трубы, водонапорные башни и др.) и открытое техническое оборудование. Данные объекты уже не точечно располагались в городах, а формировали индустриальные кварталы, узлы, зоны, а затем и целые планировочные районы в городах.

Распад Советского Союза в начале 1990-х годов вызвал глубокий кризис, сопровождавшийся разрушением сложившихся экономических и производственных связей, которые ранее функционировали в рамках единой централизованной системы. Многие предприятия прекратили свое существование, часть из них до сих пор представляет заброшенные маргинальные территории. Поэтому данный временной рубеж завершает третий период развития промышленной архитектуры – *период активного развития индустриальной застройки городов*.

В этот исторический период была осуществлена масштабная промышленная застройка городов Казахстана, архитектуре которой присущи следующие характерные черты:

- постепенное функциональное усложнение и территориальное увеличение промышленных объектов, связанное с развитием емких производств, определяющие необходимость создания собственной инженерной инфраструктуры (электроподстанций, водозаборов, складов, транспортных подъездов), а также развитием социальной сферы предприятий (столовые, комбинаты питания, фабрики кухни и т.п.);

- многообразие объемно-планировочных решений, обусловленных функционально-технологическими процессами производств. Возводятся преимущественно одноэтажные здания с доминированием широты и длины корпусов, строятся объекты двух- и более этажей, переменной этажности, а также многоэтажные. Выразительные формы инженерных и технических элементов во многом обогащали и индивидуализировали индустриальную застройку;

- использование в начале периода в качестве основного материала кирпича, а с 60-х годов XX века, в связи с ориентацией на унификацию и стандартизацию строительства, – железобетона;

- в предвоенные и военные годы для малых и средних предприятий было характерно использование упрощенных классических элементов на фасадах зданий: лопатки, пилястры, простые карнизы и фронтоны. Далее фасады зданий будут развиваться в русле функционализма и конструктивизма. Широкое применение найдут большие остекленные проемы, витражное и ленточное остекление, «многократное повторение одного и того же элемента фасада» (Демидов С.В., Хрусталева А.А., 1984 г.), образующее метрические ряды в соответствии с конструктивной схемой здания;

- индустриальная застройка, характеризующаяся главным образом плоскостным характером композиции основных зданий, за счет вертикалей инженерных сооружений стала одним из выразительных элементов в облике городов (рис. 4).

Важно отметить тот факт, что именно в этот период при размещении предприятий и градопланировании городов были созданы предпосылки для последующих экологических проблем, значительно усугубившихся в следующий исторический период.



Рисунок 4. Промышленные здания периода середины XX века – конца XX века:

а) производственный корпус, улица Джамбула, г. Алматы;

б) Актюбинский завод хромовых соединений; в) ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ»

Примечание – а) фото Самойлов К. И., 2004; б) фото «Актюбинский вестник», 2022; в) фото из официального сайта ТОО «Усть-Каменогорская ТЭЦ, 2024

С начала 90-х годов XX века начинается четвертый, современный этап развития промышленной архитектуры Казахстана, сопровождавшийся обретением независимости, новыми политическими и социальными реформами. Добывающие и перерабатывающие отрасли промышленности продолжают занимать ведущие позиции в структуре экономики, являясь основным источником формирования национального дохода и обеспечивая значительную часть экспортного потенциала страны. После некоторой стагнации возобновляется промышленное строительство новых объектов и начинается реконструкция и модернизация существующих производств. Обязательства страны перед мировым сообществом в русле концепции устойчивого развития оказывают значительное влияние на формирование современных подходов к индустриальной архитектуре (Abdrassilova G. & Danibekova E., 2021). Эти обязательства требуют адаптации промышленного строительства к экологическим стандартам, повышения энергоэффективности и внедрения технологий, минимизирующих негативное воздействие на окружающую среду. Таким образом, обозначим следующие ключевые тенденции:

- интеграция зеленых технологий в производственные процессы и архитектуру зданий. Международные сертификационные системы, такие как LEED и BREEAM, стимулируют внедрение энергосберегающих технологий, использование возобновляемых источников энергии и переработку отходов. Это приводит к созданию экологически дружелюбной промышленной архитектуры (с добавлением солнечных панелей, систем рекуперации тепла, применением инновационных строительных материалов), которая учитывает минимизацию вредного воздействия на окружающую среду;

- адаптация архитектуры зданий к региональным природно-климатическим условиям. Применение энергоэффективных фасадов, автономных систем энергоснабжения и устойчивых к экстремальным температурам конструкций обеспечивает долговечность промышленных объектов в сложных климатических условиях, придавая им функциональный и адаптированный к региону облик (Posocco Pisana, Akhmedova Aizhan, 2020);

- социальная ориентированность проектных решений на улучшение условий труда и интеграцию промышленных зданий в городскую среду. Это выражается в эстетическом оформлении фасадов, создании зелёных зон вокруг объектов и формировании благоприятного микроклимата для работников;

- реновация заброшенных промышленных территорий, включающая восстановление и модернизацию объектов под современные потребности общества в целях устойчивого развития городов (Amangeldikyzy Raushan, Amandykova Dina & Tokayuk Andrzej, 2023);

- сохранение и активное включение памятников промышленного назначения в культурно-исторический контекст поселений для создания гармоничной и многофункциональной городской среды.

Закключение. Развитие промышленной архитектуры Казахстана прошло долгий и сложный путь, отражая изменения в экономике, технологиях и социальных потребностях. На протяжении всей истории архитектура промышленных объектов эволюционировала от простых сооружений, отражающих экономические и технологические ограничения своего времени, до современных высокотехнологичных зданий.

В результате обзорного исследования было выделено четыре основных периода развития промышленной архитектуры на территории современного Казахстана:

- первый период (2-е тысячелетие до н.э. – середина XVIII века) – период формирования сырьевой промышленной базы и ареалов промышленного освоения территории;
- второй период (середина XVIII века – 20-е годы XX века) – период начала формирования индустриальной среды городов;
- третий период (20-е годы XX века – начало 90-х годов XX века) – период активного развития индустриальной застройки городов;
- четвертый период (с начала 90-х годов XX века по настоящее время) – современный период трансформации и адаптации промышленной застройки в урбанистический контекст современного города.

Для каждого исторического периода характерны свои предпосылки развития, определявшиеся социально-экономическими, природными, политическими, технологическими, культурно-историческими и экологическими факторами. Примечательно, что промышленность Казахстана, зародившись в глубокой древности в русле добычи руды и металлургии, сохраняет этот «исторический бренд» по настоящее время.

Современные промышленные предприятия становятся высокотехнологичными центрами с автоматизированными процессами и минимальным участием человека, адаптируясь к изменениям рынка. Будущее промышленной архитектуры связано с интеграцией проектирования, инженерии, экологии и урбанистики, что позволит создавать функциональные, эстетичные и устойчивые объекты. Приоритетом станет устойчивое развитие, включающее сокращение углеродного следа, использование возобновляемых источников энергии и внедрение замкнутых циклов потребления ресурсов. Эти тенденции свидетельствуют о том, что промышленная архитектура Казахстана продолжает развиваться, отражая изменения в технологиях, обществе и экономике.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследование выполнено за счет средств авторов.

«Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи». При подготовке данной работы авторы использовали искусственный интеллект ChatGPT с целью обработки текстовых данных.

Список литературы

- Abdrassilova G., Danibekova E. (2021). The transformation of modern architecture in Kazakhstan: from soviet "internationalism" to a post-soviet understanding of the regional identity. SPATIUM, no. 46, 73-80, <https://doi.org/10.2298/SPAT2146073A>.
- Amangeldikyzy R., Amandykova D., Tokayuk A. (2023). Architectural Renovation of Industrial Buildings on the Example of Large Cities of Kazakhstan. Future Cities and Environment, 9(1), 6, 1-15, <https://doi.org/10.5334/fce.172>.
- Glaudina M.B., Gladinov B., Galimzhanova A.S., Amandykova D.A., Samoilov K.I., Priemets O.N. (2019). History of Kazakhstan Architecture. International Educational Corporation, 160 p.

- Posocco P., Akhmedova A. Kazakhstan. (2020). Kazakhstan. Soviet and contemporary architecture. DiAP in the world. International Vision, 241-257.
- Абсеметов М.О., Зиновьев В.П. (2016). К вопросу об особенностях процесса модернизации Казахстана в 1920-1940-е гг. Вестник Томского государственного университета, №410, 19-23, <https://doi.org/10.17223/15617793/410/3>. // Absemetov M. O., Zinov'ev V. P. (2016). K voprosu ob osobennostjah processa modernizacii Kazakhstana v 1920-1940-e gg. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, №410, 19-23, <https://doi.org/10.17223/15617793/410/3>.
- Бимендиев А.Ш., Байпаков К.М. (2008). Большой атлас истории и культуры Казахстана. АО «АБДИ Компани», 880 с. // Bimendiev A.Sh., Bajpakov K.M. (2008). Bol'shoj atlas istorii i kul'tury Kazakhstana. АО «ABDI Kompani», 880 p.
- Демидов С.В., Хрусталева А.А. (1984). Архитектурное проектирование промышленных предприятий. – М.: Стройиздат, 392 с. // Demidov S.V., Hrustaleva A.A. (1984). Arhitekturnoe proektirovanie promyshlennyh predpriyatij. – М.: Strojizdat, 392 p.
- Джумагалиева К.В. (2010). Развитие соляного промысла в Западном Казахстане в XIX веке. Автореферат, 29 с. // Dzhumagalieva K.V. (2010). Razvitie soljanogo promysla v Zapadnom Kazakhstane v XIX veke. Avtoreferat, 29 p.
- История Павлодара (1 часть). (2021). ProPlv, <https://propvl.kz/istoriya-pavlodara-1-chast/> // Istorija Pavlodara (1 chast'). (2021). ProPlv, <https://propvl.kz/istoriya-pavlodara-1-chast/>.
- Пивоваренный завод купца Лореца. (2013). Rutraveller, <https://rutraveller.ru/place/58013>. // Pivovarennyj zavod kupca Loreca. (2013). Rutraveller, <https://rutraveller.ru/place/58013>.
- Рындина Н.В., Дегтярева А.Д. (2002). Энеолит и бронзовый век. Учебное пособие по курсу «Основы археологии», 225 с. // Ryndina N.V., Degtjareva A.D. (2002). Jeneolit i bronzovyj vek. Uchebnoe posobie po kursu «Osnovy arheologii», 225 p.
- Самойлов К.И. (2004). Архитектура Казахстана XX века (развитие архитектурно-художественных форм). Издательство «М-Ари», 930 с. // Samojlov K. I. (2004). Arhitektura Kazakhstana XX veka (razvitie arhitekturno-hudozhestvennyh form). Izdatel'stvo «M-ARi», 930 p.
- Тужаева, А.К., Огулева А.Д. (2022). Особенности архитектурных памятников Северного Казахстана. Международная образовательная корпорация кампус Казахская головная архитектурно-строительная академия, том 12, №3, 88-94, <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2022.03.12>. // Tujakaeva, A.K., Oguleva A.D. (2022). Osobennosti arhitekturnyh pamjatnikov Severnogo Kazakhstana. Mezhdunarodnaja obrazovatel'naja korporacija kampus Kazahskaja golovnaja arhitekturo-stroitel'naja akademija, tom 12, №3, 88-94, <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2022.03.12>.
- Чекаева, Р.У., Ревтова В.В. (2017). Памятники промышленной архитектуры города Петропавловск. Научно-издательский центр «Мир науки», 216-222. // Chekaeva, R.U., Revtova V.V. (2017). Pamjatniki promyshlennoj arhitektury goroda Petropavlovsk. Nauchno-izdatel'skij centr "Mir nauki", 216-222.
- Экологический проект АЗХС. (2022). "Актюбинский Вестник", <https://avestnik.kz/ekologicheskij-proekt-azhs/>. // Jekologicheskij proekt AZHS. (2022). "Aktjubinskij Vestnik", <https://avestnik.kz/ekologicheskij-proekt-azhs/>.

Information about authors

Serikova Ainur – undergraduate, D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, serikova.ainura111@gmail.com, +7 771 051 18 55

Inozemtseva Tatiana Alexandrovna – candidate of Architecture, D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, Veduga75@mail.ru, +7 705 506 26 91

Feoktistova Elena Alexandrovna – candidate of Architecture, D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, EFeoktistova@ektu.kz, +7 777 284 02 54

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_281
MPHTI 67.09.33

Р.Б. Тлегенов¹, Р. К. Ниязбекова², С.С. Алдабергенова³,
А.Е. Джексембаева⁴, М.Д. Конканов⁵

¹Казахский агротехнический исследовательский университет им. Сакена Сейфуллина,
Казахстан, г. Астана

E-mail: tlegenovrassul@gmail.com*

E-mail: rimma.n60@mail.ru

E-mail: ass_1982@mail.ru

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

E-mail: dzheksembayeva_ae@mail.ru

E-mail: marcon@metrology.kz

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ ПОЛИМЕРНОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ЗАПОЛНИТЕЛЯ ИЗ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ С ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В АСТАНЕ

АСТАНАДАҒЫ ЖЫЛУ ЭЛЕКТР СТАНЦИЯСЫНАН ҰШАТЫН КҮЛ ТОЛТЫРҒЫШЫНЫҢ НЕГІЗІНДЕГІ ПОЛИМЕРЛІ БЕТОННЫҢ ЖЫЛУ ӨТКІЗГІШТІГІ

THERMAL CONDUCTIVITY OF POLYMER CONCRETE BASED ON AGGREGATE FROM FLY ASH FROM THERMAL POWER PLANT IN ASTANA

Аннотация. Включение летучей золы в качестве заполнителя в полимерный бетон позволяет эффективно снизить теплопроводность полимерного бетона, повышая его потенциал в качестве энергоэффективного строительного материала. Такое снижение теплопроводности особенно полезно для тех сфер применения, где требуется изоляция, поскольку модифицированный полимерный бетон может выполнять функцию теплового барьера в крышах, стенах и полах. Полимерный бетон с добавлением летучей золы, благодаря ее изоляционным свойствам, становится пригодным для применения в тех областях, где регулирование температуры и энергосбережение имеют решающее значение. Кроме того, эти результаты подчеркивают потенциал полимерного бетона с летучей золой для удовлетворения растущего спроса на энергоэффективные материалы в строительстве.

Будущие исследования необходимы для изучения влияния различных факторов, таких как тип и гранулометрический состав летучей золы, на теплопроводность полимерного бетона. Кроме того, необходимо изучить пригодность полимерного бетона на основе летучей золы для использования в других конструкциях, например, в мостостроении и инфраструктуре, где требуются высокая долговечность и устойчивость к воздействию факторов окружающей среды. Такие исследования позволят получить полное представление о более широких последствиях использования летучей золы в полимерном бетоне, способствуя развитию устойчивых методов строительства.

Ключевые слова: полимербетон, летучая зола, энергоменеджмент, энергоэффективность, теплопроводность, экологическое преимущество.

Аңдатпа. Күлді полимерлі бетонға агрегат ретінде қосу полимерлі бетонның жылу өткізгіштігін тиімді төмендетіп, оның энергияны үнемдейтін құрылыс материалы ретіндегі әлеуетін арттыра алады. Жылу өткізгіштіктің бұл төмендеуі әсіресе оқшаулауды қажет ететін қолданбалар үшін пайдалы, өйткені модификацияланған полимерлі бетон шатырларда, қабырғаларда және едендерде жылу тосқауылы ретінде әрекет ете алады. Шыбын күлінің оқшаулағыш қасиеттерін пайдалана отырып, полимерлі бетон температураны бақылау және энергияны үнемдеу өте маңызды қолданбаларға жарамды болады.

Сонымен қатар, бұл нәтижелер құрылыстағы энергияны үнемдейтін материалдарға өсіп келе жатқан сұранысты қанағаттандыру үшін күлді полимерлі бетонның әлеуетін көрсетеді. Шыбын күлінің түрі мен бөлшектерінің мөлшерінің таралуы сияқты әртүрлі факторлардың

полимерлі бетонның жылу өткізгіштігіне әсерін зерттеу үшін болашақ зерттеулер қажет. Сонымен қатар, күл негізіндегі полимерлі бетонның жоғары беріктігі мен қоршаған орта факторларына төзімділігі қажет көпір мен инфрақұрылым сияқты басқа құрылымдарда қолдануға жарамдылығын зерттеу қажет. Мұндай зерттеулер тұрақты құрылыс әдістерінің дамуына ықпал ете отырып, полимерлі бетондағы шыбын күлінің кеңірек әсерін жан-жақты түсінуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: полимербетон, ұшпа күл, энергия менеджменті, энергия тиімділігі, жылу өткізгіштік, экологиялық артықшылық.

Abstract. Incorporating fly ash as an aggregate in polymer concrete can effectively reduce the thermal conductivity of polymer concrete, increasing its potential as an energy efficient building material. This reduction in thermal conductivity is particularly useful for applications where insulation is required, as the modified polymer concrete can act as a thermal barrier in roofs, walls and floors. By utilising the insulating properties of fly ash, polymer concrete becomes suitable for applications where temperature control and energy conservation are critical.

In addition, these results highlight the potential of fly ash polymer concrete to meet the growing demand for energy efficient materials in construction. Future studies are needed to investigate the effect of various factors, such as type and particle size distribution of fly ash, on the thermal conductivity of polymer concrete. In addition, the suitability of fly ash based polymer concrete for use in other structures such as bridge and infrastructure where high durability and resistance to environmental factors are required needs to be investigated. Such studies will provide a comprehensive understanding of the wider implications of fly ash in polymer concrete, contributing to the development of sustainable construction methods.

Keywords: polymer concrete, fly ash, energy management, energy efficiency, thermal conductivity, environmental benefit.

Введение. Полимербетон – это композитный материал, который изготавливается путем смешивания полимерных смол с заполнителями и водой (Kumar, 2016). Полимерные смолы выступают в качестве связующего, а заполнители обеспечивают прочность и долговечность. Полимерный бетон имеет ряд преимуществ перед традиционным бетоном, в том числе:

- полимербетон легкий и удобный в работе;
- обладает хорошими теплоизоляционными свойствами (Varghese, 2015);
- устойчив к химическим веществам и коррозии;
- имеет длительный срок службы (Xu et al., 2024).

Летучая зола – это побочный продукт сжигания угля. Она представляет собой мелкий порошок, который обычно имеет серый или черный цвет (Poveda-Orjuela et al., 2019). Летучая зола обладает рядом свойств, которые делают ее хорошим кандидатом для использования в полимерном бетоне, в том числе:

- Легкость. Плотность летучей золы составляет около $2,2 \text{ г/см}^3$, что примерно в два раза меньше плотности традиционных заполнителей для бетона;
- При благоприятных параметрах ($\text{CaO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 \geq 70 \%$, удельная поверхность $\geq 300 \text{ м}^2/\text{кг}$, t гидратации $> 40 \text{ }^\circ\text{C}$) зола-унос проявляет пуццолановую активность – реагирует с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и образует вторичные C-S-H-фазы, повышая прочность бетона;
- При низком CaO ($< 5 \%$) или удельной поверхности $< 250 \text{ м}^2/\text{кг}$, а также без щелочных/тепловых активаторов зола ведёт себя ****условно инертно**** и выполняет роль микрозаполнителя-разбавителя цементного камня;
- Сравнительно недорогой материал. Летучая зола — это отходы, поэтому ее получение обходится относительно недорого (Hamada et al., 2024).

Теплопроводность – это показатель того, насколько хорошо материал проводит тепло. Это важное свойство для строительных материалов, поскольку оно может влиять на количество энергии, необходимой для обогрева или охлаждения здания. Материалы с низкой теплопроводностью являются хорошими изоляторами, а материалы с высокой теплопроводностью – хорошими проводниками (Niyazbekova et al., 2023)

В табл. 1 описаны особенности использования летучей золы в разных странах. Для каждой страны указываются основные направления применения летучей золы (например, производство бетона, дорожное строительство) и ключевые характеристики, такие как доступность золы, экологические нормы и усилия по ее утилизации. Основной акцент сделан на то, как каждая страна подходит к использованию летучей золы, например, в качестве замены цемента в производстве бетона или как строительного материала. Также затрагиваются вопросы экологической устойчивости и регулирования утилизации отходов, рассматривается потенциал для расширения применения летучей золы в будущем.

Таблица 1. Сравнительный анализ использования летучей золы в разных странах

Страна	Использование летучей золы	Характеристики
Соединенные Штаты	Производство бетона, дорожное строительство	Доступность в большом количестве, обычно используется в качестве частичной замены цемента
Китай	Производство бетона, изготовление кирпича	Большие объемы производства, значительное воздействие на окружающую среду, если не управлять им
Индия	Производство бетона, цементная промышленность	Высокое содержание золы в угле, все большее использование для устойчивого строительства (Wang et al., 2023)
Германия	Производство бетона, стабилизация почвы	Строгие правила утилизации летучей золы, высокие экологические стандарты
Австралия	Производство бетона, строительство насыпей	Ограниченное использование из-за опасений по поводу качества угля и выбросов в атмосферу
Канада	Производство бетона, цементная промышленность	Растущее использование в устойчивом строительстве, акцент на ответственном захоронении
Япония	Производство бетона, дорожное строительство	Высококачественная летучая зола, строгие правила удаления и утилизации
Бразилия	Производство бетона, производство кирпича	Растущее использование в строительстве, усилия по продвижению устойчивой практики
Казахстан	Производство бетона, тепловые электростанции, дорожное строительство	Значительное производство летучей золы, потенциал для увеличения утилизации, акцент на управление отходами и устойчивые практики
<i>Примечание – составлено автором</i>		

Заполнитель из летучей золы является пуццолановым материалом. Это означает, что он вступает в реакцию с известью, образуя цементирующие соединения (Tlegenov et al., 2024). Эти цементирующие соединения могут повысить прочность и долговечность полимерного бетона. Заполнитель из летучей золы имеет небольшой вес, что может сделать полимербетон более энергоэффективным (Liu et al., 2023).

Летучая зола собирается из дымовых газов тепловой электростанции с помощью электрофильтров или багги. Затем летучая зола транспортируется на перерабатывающий завод, где она измельчается в мелкий порошок (Kalení et al., 2022). Затем порошок просеивается для удаления крупных частиц. Просеянный порошок летучей золы готов к использованию в полимерном бетоне (Jaganathan & Kumar, 2021).

Использование заполнителя из летучей золы в полимерном бетоне может дать ряд преимуществ, включая:

- снижение затрат. Летучая зола является отходом производства, поэтому ее получение обходится относительно недорого. Использование заполнителя из летучей золы может помочь снизить стоимость полимерного бетона (Sitarz et al., 2013);
- повышенная прочность и долговечность. Летучая зола обладает пуццолановыми свойствами, что означает, что она вступает в реакцию с известью, образуя цементирующие соединения. Эти цементирующие соединения могут повысить прочность и долговечность полимербетона;
- снижение теплопроводности. Летучая зола является хорошим изолятором, поэтому использование заполнителя из летучей золы может помочь снизить теплопроводность полимерного бетона, сделав полимербетон более энергоэффективным строительным материалом (Kowalska et al., 2024).

Материалы и методы исследования. Целью данного исследования является изучение теплопроводности полимербетона, изготовленного с использованием заполнителя из летучей золы с теплоэлектростанции в Астане. Результаты данного исследования будут использованы для оценки потенциала полимерного бетона, изготовленного с использованием заполнителя из летучей золы, для использования в строительстве, где требуется теплоизоляция.

Методы исследования. В работе использовались стандартизированные методы испытаний цементного теста: определение нормальной толщины, времени схватывания цементного теста, определение физико-механических параметров полистиролбетона в соответствии с международными стандартами. Размер частиц летучей золы определялся с помощью лазерного анализатора. Фазовый состав образцов гидратированного бетона изучали рентгеновским методом, структуру затвердевших образцов исследовали методами электронной микроскопии.

Использовались следующие материалы:

(1) в качестве вяжущего материала – портландцемент М400 (АО «Кокшетауский цемент», г. Кокшетау, Казахстан). Начальное время схватывания портландцемента составляет 107 мин, конечное время схватывания – 260 мин. Химический и минеральный составы описаны в табл. 2;

(2) суперпластификатор MasterGlenium 116 (Master Builders Solution, Астана, Казахстан). Рекомендуемая дозировка по Master Builders Solution составляет 0,4-2,0 % от массы цемента. Точное количество добавки должно быть определено в лаборатории путем приготовления пробных смесей. Текущее исследование показало, что 0,5 % является наилучшей консистенцией для добавления в цементную смесь;

(3) полистирольные гранулы того же типа весом 14-20 кг на 1 м³, размер гранул 1,0-1,6 мм, производства ОАО «Сибур-Химпром» (Российская Федерация);

(4) летучая зола с главной электростанции Астаны. Зола засыпали в шаровую мельницу и мололи в течение 2,4 ч мелющими шарами диаметром 40 мм.

Таблица 2. Химический состав портландцемента

№	Цемент	Химический состав, %							
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	O ₃	Потери при сжигании	Итого
1	Портландцемент	20,49	4,80	4,40	63,42	1,47	25	1,55	99,14

Примечание – составлено автором

В исследовании полистиролбетон был изготовлен в соответствии с рациональным распределением в процентах. Исследовался полистиролбетон с содержанием от 5 % до 15 % летучей золы от общей массы цементного раствора. Содержание полистирола во всех образцах составляет 60 % заполнения по объему образца.

Результаты анализа состава образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Состав золы Астанинской ТЭЦ

№	Элемент	Образец № 1 (Пор.)	Образец № 2 (Пор.)	Образец № 3 (Пор.)	Образец № 4 (Жид.)	Образец № 5 (Жид.)	Образец № 6 (Жид.)	Образец № 7 (Жид.)	Образец № 8 (Жид.)
1	Al	17,346	19,755	19,608					
2	Si	40,919	50,989	52,327	13,720	9,509	10,431	7,887	5,853
3	P	0,610	0,695	0,717			6,514	22,341	20,289
4	S	0,199	0,091	0,079	2,436	1,219	1,253	1,207	
5	Cl	0,126	0,171	0,172	0,003	0,007	0,204	0,000	1,138
6	K	1,629	2,094	2,207	3,260	1,089	1,814		3,418
7	Ca	9,926	4,155	3,350	74,143	78,754	72,453	57,317	56,565
8	Ti	2,847	2,998	3,170	0,608	1,033	1,043		
9	V	0,059	0,055	0,060		0,013			
10	Mn	0,405	0,321	0,303	0,168	0,255			
11	Fe	24,916	17,659	16,999	4,981	7,795	3,567	2,224	2,689
12	Ni	0,001	0,004						
13	Si	0,045	0,053	0,051					
14	Zn	0,018	0,069	0,032					
15	Ga	0,013	0,013	0,014					
16	As	0,004	0,004	0,004					
17	Rb	0,012	0,014	0,015					
18	Sr	0,236	0,230	0,237		0,023			
19	Y	0,025	0,025	0,025					
20	Zr	0,140	0,155	0,166					
21	Nb	0,006	0,006	0,006					
22	Sb	0,028	0,026	0,025	0,340	0,139	1,440	4,773	5,296
23	Te	0,018	0,021	0,017	0,288	0,113	1,261	4,243	4,573
24	Ba	0,287	0,251	0,254					
25	Eu	0,162	0,120	0,115	0,053	0,041			
26	Yb	0,017	0,015	0,016					
27	Re	0,000	0,000	0,000					
28	Os	0,000	0,000	0,000					
29	Ir	0,000	0,000	0,000					
30	Pb	0,004	0,008	0,009					
31	Nd		0,002	0,002					
32	Lu			0,014					
33	Rh				0,000			0,009	
34	Cr					0,10			

Примечание – составлено автором

Результаты и их обсуждение. Экспериментальная методология, использованная в данном исследовании, представляет собой стандартный метод измерения теплопроводности материалов. Испытания теплопроводности и термического сопротивления строительных материалов проводились на ИТП-МГ4«250», предназначенном для тепловой изоляции промышленного оборудования и трубопроводов при стационарном режиме по ГОСТ 7076 и методом теплового зонда по ГОСТ 30256. Тепловой поток через образец измерялся, а теплопроводность рассчитывался.

При проведении расчетов значение объемной теплоемкости уменьшают в 10 раз для зонда диаметром 1 мм и в 10 раз – для зондов диаметрами 3 и 5 мм.

Заполнитель из летучей золы, полимерная смола и добавки были смешаны вместе в миксере Controls. Смесь перемешивалась в течение 3 минут на низкой скорости, а затем в течение 1 минуты на высокой скорости. Затем полимерный бетон заливался в формы и отвердевал при комнатной температуре в течение 28 дней.

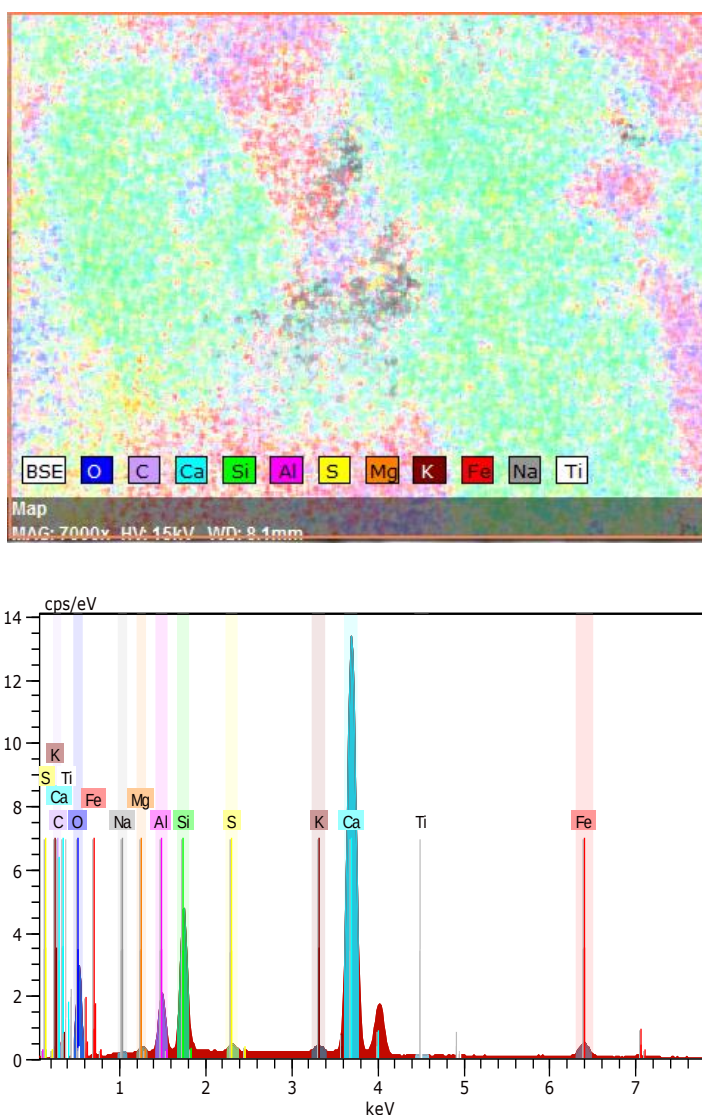


Рисунок 1. РМ Размер изображения: 480 x 360. Увеличение: 7000x

Примечание – составлено автором

Было обнаружено, что теплопроводность полимерного бетона уменьшается по мере увеличения содержания летучей золы. Теплопроводность полимерного бетона с 0 % золы составляла 0,340 Вт/м-К, а теплопроводность полимерного бетона с 15 % золы и суперпластификатора составляла 0,165 Вт/м-К. Это объясняется тем, что зола является хорошим изолятором, поэтому с увеличением содержания золы теплопроводность полимербетона уменьшается.

С увеличением дозировки золы в качестве заменителя заполнителя теплопроводность уменьшается по сравнению с контрольным образцом, как показано в табл. 4. Самые низкие значения теплопроводности были также получены для образца № 21.

Таблица 4. Физико-механические свойства испытанного полистиролбетона

№	Образец	Летучая зола %	Дни	Теплопроводность
1	Контрольный образец	0	3	0,35
2		0	7	0,34
3		0	28	0,34
4	С добавлением летучей золы	5	3	0,3
5		10	3	0,29
6		15	3	0,29
7		5	7	0,3
8		10	7	0,29
9		15	7	0,29
10		5	28	0,3
11		10	28	0,29
12		15	28	0,29
13	С добавлением летучей золы и суперпластификатора	5	3	0,170
14		10	3	0,166
15		15	3	0,166
16		5	7	0,169
17		10	7	0,166
18		15	7	0,165
19		5	28	0,169
20		10	28	0,166
21		15	28	0,165
Примечание – составлено автором				

Полученные результаты показывают, что все показатели прочности бетона с полистиролом, содержащим летучую золу, выше, чем у контрольного образца бетона. Наименьшее значение связано с контрольным образцом, не содержащим золу и суперпластификатор. Наилучшие показатели по теплопроводности показал образец, содержащий 60 % полистирола и 15 % золы по сравнению с контрольным образцом, где разница в теплопроводности составляет 51,47 %.

Результаты данного исследования показывают, что теплопроводность полимерного бетона может быть снижена за счет использования заполнителя из летучей золы. Использование заполнителя из летучей золы может сделать полимербетон более энергоэффективным строительным материалом. Это связано с тем, что зола является хорошим изолятором, поэтому при увеличении содержания золы теплопроводность полимербетона снижается (Aiken et al., 2021).

Результаты данного исследования также показывают, что добавление летучей золы в качестве заполнителя оказывает значительное влияние на теплопроводность полимербетона. С добавлением летучей золы теплопроводность полимербетона уменьшается.

Последствия результатов данного исследования заключаются в том, что использование заполнителя из летучей золы может сделать полимербетон более энергоэффективным строительным материалом (Bumanis, Bajare, Korjajins, 2013). Это связано с тем, что зола является хорошим изолятором, поэтому при увеличении содержания золы теплопроводность полимербетона снижается.

Результаты данного исследования также имеют значение для использования полимербетона в строительстве, где требуется теплоизоляция. Например, полимербетон можно использовать в качестве теплоизоляционного материала в крышах, стенах и полах.

Заключение.

Использование заполнителя из летучей золы в полимерном бетоне может снизить теплопроводность полимерного бетона. Это может сделать полимербетон более энергоэффективным строительным материалом. Результаты данного исследования также имеют значение для использования полимерного бетона в строительстве, где требуется теплоизоляция. Например, полимерный бетон может использоваться в качестве теплоизоляционного материала в крышах, стенах и полах.

Будущие исследования необходимы для изучения влияния других факторов, таких как тип летучей золы и ее гранулометрический состав, на теплопроводность полимербетона. Эти исследования также необходимы для изучения использования заполнителя из летучей золы в полимерном бетоне для других применений, например, при строительстве мостов и других сооружений. И, наконец, необходимы исследования для изучения долгосрочной долговечности полимерного бетона, изготовленного с использованием заполнителя из летучей золы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данное исследование финансируется в рамках программно-целевого финансирования Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882278 «Создание строительно-технического инжинирингового центра по оказанию полного цикла аккредитованных услуг строительного, дорожно-строительного сектора Республики Казахстан»).

«Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи». При подготовке данной работы автор(ы) использовали Open AI с целью структурирования текста.

Список литературы

- Kumar, R. (2016). A review on epoxy and polyester based polymer concrete and exploration of polyfurfuryl alcohol as polymer concrete. *Journal of Polymers*, 2016(1), 7249743.
- Xu, X., Bao, S., Zhang, Y., & Ping, Y. (2024). Sustainable enhancement of fly ash-based geopolymers: Impact of Alkali thermal activation and particle size on green production. *Process Safety and Environmental Protection*, 191, 478-489.
- Poveda-Orjuela, P. P., García-Díaz, J. C., Pulido-Rojano, A., & Cañón-Zabala, G. (2019). ISO 50001: 2018 and its application in a comprehensive management system with an energy-performance focus. *Energies*, 12(24), 4700.
- Hamada, H. M., Abed, F., Al-Sadoon, Z. A., & Alashkar, A. (2024). Enhancing pozzolanic activity of fly ash via dry and wet milling: A comparative study for sustainable construction material enhancement. *Journal of CO2 Utilization*, 83, 102811.
- Niyazbekova, R., Mukhambetov, G., Tlegenov, R., Aldabergenova, S., Shansharova, L., Mikhailchenko, V., & Bembenek, M. (2023). The Influence of Addition of Fly Ash from Astana Heat and Power Plants on the Properties of the Polystyrene Concrete. *Energies*, 16(10), 4092.

- Tlegenov, R.B., Niyazbekova, R.K., Jexembayeva, A.E., Korniejenko, K., Aruova, L.B., Aldabergenova, S.S., & Maykonov, A. S. (2024). The effect of fly ash additive on the thermal conductivity of polystyrene concrete. *Buildings*, 14(9), 2850.
- Liu, W., Zhu, H., Wu, X., Wan, Y., Zheng, W., & Li, H. (2023). Comparative study on the performance of ultra-fine fly ash prepared by different techniques in Portland cement and alkali-activated material. *Construction and Building Materials*, 397, 132362.
- Kaleni, A., Magagula, S. I., Motloun, M. T., Mochane, M. J., & Mokhena, T. C. (2022). Preparation and characterization of coal fly ash reinforced polymer composites: An overview. *Express Polymer Letters*, 16(7).
- Jaganathan, K., & Kumar, G. R. (2021). An experimental study on polymer impregnated concrete with fly ash. In *Journal of Physics: Conference Series* (7).
- Kowalska, B. Z., Szajding, A., Zakrzewska, P., Kuźnia, M., Stanik, R., & Gude, M. (2024). Disposal of rigid polyurethane foam with fly ash as a method to obtain sustainable thermal insulation material. *Construction and Building Materials*, 417, 135329.
- Varghese, P. C. (2015). *Building materials*. PHI Learning Pvt. Ltd..
- Wang, J., Fan, Y., Che, Z., Zhang, K., & Niu, D. (2023). Study on the durability of eco-friendly recycled aggregate concrete with supplementary cementitious materials: The combined action of compound salt solution of MgSO₄, Na₂SO₄, and NaCl and dry-wet cycles. *Construction and Building Materials*, 377, 131149.
- Sitarz, M., Figiela, B., Łach, M., Korniejenko, K., Mróz, K., Castro-Gomes, J., & Hager, I. (2022). Mechanical response of geopolymer foams to heating—Managing coal gangue in fire-resistant materials technology. *Energies*, 15(9), 3363.
- Bumanis, G., Bajare, D., & Korjaks, A. (2013). Mechanical and thermal properties of lightweight concrete made from expanded glass. *Journal of sustainable architecture and civil engineering*, 2(3), 19-25.
- Aiken, T. A., Kwasny, J., Sha, W., & Tong, K. T. (2021). Mechanical and durability properties of alkali-activated fly ash concrete with increasing slag content. *Construction and Building Materials*, 301, 124330.

Information about authors

Tlegenov Rassul Bolatuly – Doctoral student on speciality 'Standardisation and Certification', Technical Faculty, Kazakh Agrotechnical Research University named after Saken Seyfullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, tlegenovrassul@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-1959-9414>, 8-775-950-90-43

Niyazbekova Rimma Kalmanbaevna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Technical Faculty, Kazakh Agrotechnical Research University named after Saken Seyfullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, rimma.n60@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8688-1408>, 8-775-134-36-30

Aldabergenova Saule Salimzhanovna – PhD, Head of Department 'Standardisation and Certification', Technical Faculty, Kazakh Agrotechnical Research University named after Saken Seyfullin, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, ass_1982@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6297-7632>, 8-707-854-49-61

Jexembayeva Assel Ermekeovna – PhD, Director of Innovation Development Department, Eurasian National University named after L.N. Gumilev. L.N. Gumilev Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, dzheksembayeva_ae@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-6153-9580>, 8-701-888-25-87

Konkanov Marat Dzhumataevich – PhD, Director of Scientific and Production Centre 'ENU-Lab', L.N. Gumilev Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, 8-701-801-25-88. L.N. Gumilev Eurasian National University, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan, marcon@metrology.kz, <https://orcid.org/0009-0006-9365-4127>, 8-777-008-08-07

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_2_290
MPHTI 67.25.25

С.И. Чалы¹, А.А. Корнилова²

Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
г. Астана, Казахстан

¹E-mail: Sultan.chaly@gmail.com*

²E-mail: 5328864@mail.ru

КОНТРОЛИРУЕМЫЙ МИКРОКЛИМАТ В АРХИТЕКТУРНОЙ СРЕДЕ ЖИЛЫХ ОБРАЗОВАНИЙ СЕВЕРНОГО КАЗАХСТАНА

CONTROLLED MICROCLIMATE IN THE ARCHITECTURAL ENVIRONMENT OF RESIDENTIAL FORMATION IN NORTHERN KAZAKHSTAN

СОЛТҮСТІК ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ ТҰРҒЫН ОРТАЛАРЫНЫҢ СӘУЛЕТТІК ОРТАСЫНДАҒЫ БАСҚАРЫЛАТЫН МИКРОКЛИМАТ

Аннотация. В данной работе представлены рекомендации в проектировании архитектурной среды жилых образований с учетом климатических условий Северного Казахстана. Рассмотрены пути адаптации архитектуры и создания комфортных условий в резко континентальном климате. Города Северного Казахстана на современном этапе развития застраивались во многом без учета экстремальных низких температур, а также знойных и сухих жарких дней. В связи с этим условия для пребывания людей в открытой архитектурной среде весьма затруднительны, из этого вытекает необходимость адаптации архитектуры к суровым климатическим условиям. Решением климатических проблем региона может стать искусственно воссозданная архитектурная среда жилых образований, удовлетворяющая потребностям жителей города. Это проектирование придомовых и дворовых пространств с искусственно выработанным микроклиматом, который организовал бы комфортное пребывание во внешней архитектурной среде в любое время года. Данное новшество могло бы способствовать большому скачку в организации и проектировании архитектурной среды жилых образований в регионах с суровым климатом. Организация искусственного микроклимата в открытом пространстве на современном этапе развития технологий строительства и строительных материалов не является недостижимой целью, а напротив, весьма актуальным явлением, особенно в условиях информационного и технологического прогресса. Цель исследования – определить способы, с помощью которых возможно воссоздать искусственный микроклимат в архитектурной среде жилых образований с благоприятными условиями для нахождения человека в любое время года в открытом городском пространстве, и развитие в проектировании архитектурной среды направления, занимающегося адаптацией суровых климатических условий, для создания благоприятного микроклимата. В процессе исследовательской работы были изучены теоретические аспекты проектирования архитектурной среды, проведен ретроспективный анализ работ, связанных с организацией микроклимата в суровых погодных условиях, определены принципы и методы проектирования искусственного микроклимата в региональных условиях Северного Казахстана, изучены и обследованы более 20 общественных пространств, таких как парки, придомовые пространства и дворы, в городах Астана, Павлодар и Костанай.

Ключевые слова: Северный Казахстан, искусственный микроклимат, климатические условия, архитектурная среда, микроклиматический модуль, жилые пространства, ETFE мембрана.

Аңдатпа. Бұл жұмыста Солтүстік Қазақстанның климаттық жағдайларын ескере отырып, тұрғын үйлердің архитектуралық ортасын жобалау бойынша ұсыныстар берілген. Шұғыл континенттік климатта сәулетті бейімдеу және қолайлы жағдай жасау жолдары қарастырылған. Солтүстік Қазақстанның қалалары қазіргі даму кезеңінде негізінен өте төмен температураларды, сондай-ақ ызғарлы және құрғақ ыстық күндерді есепке алмастан салынды. Осыған байланысты адамдардың ашық сәулеттік ортада тұру жағдайлары өте қиын, бұл

архитектуруны қатаң климаттық жағдайларға бейімдеу қажеттілігін білдіреді. Аймақтың климаттық мәселелерін шешудің жолы қала тұрғындарының қажеттіліктерін қанағаттандыратын тұрғын үй құрылымдарының жасанды түрде қайта жасалған сәулеттік ортасы болуы мүмкін. Яғни, жылдың кез келген уақытында сыртқы сәулеттік ортада жайлы тұруды ұйымдастыратын жасанды микроклиматы бар үй мен аула кеңістіктерін жобалау. Өз кезегінде бұл жаңалық климаты қатал аймақтардағы тұрғын үйлердің сәулеттік ортасын ұйымдастыру мен жобалауда үлкен серпіліс тудыруы мүмкін. Құрылыс технологиялары мен құрылыс материалдарының дамуының қазіргі кезеңінде ашық кеңістікте жасанды микроклиматты ұйымдастыру қол жетпес мақсат емес, керісінше, әсіресе ақпараттық-техникалық прогресс жағдайында өте өзекті құбылыс. Зерттеудің мақсаты – тұрғын үйлердің сәулеттік ортасында жасанды микроклиматты қалпына келтірудің жолдарын анықтау. Адамдардың жылдың кез келген уақытында ашық қала кеңістігінде болуы үшін қолайлы жағдай жасау. Қолайлы микроклиматты құру мақсатында қатал климаттық жағдайларды бейімдеумен айналысатын сәулеттік ортаны жобалаудың бағытын өзірлеу. Ғылыми-зерттеу жұмысының барысында: сәулеттік ортаны жобалаудың теориялық аспектілері зерттелді, қатал ауа райы жағдайында микроклиматты ұйымдастыруға байланысты жұмыстарға ретроспективті талдау жасалды. Солтүстік Қазақстанның аймақтық жағдайында жасанды микроклиматты жобалаудың принциптері мен әдістері анықталды. Астана, Павлодар, Қостанай сияқты қалалардағы саябақтар, іргелес аумақтар мен аулалар 20-дан астам қоғамдық орындар зерттеліп, сарапталды.

Түйін сөздер: Солтүстік Қазақстан, жасанды микроклимат, климаттық жағдайлар, сәулеттік орта, микроклиматтық модуль, тіршілік кеңістіктері, ETFE мембранасы.

Abstract. This paper presents recommendations for designing the architectural environment of residential buildings taking into account the climatic conditions of Northern Kazakhstan. The paper considers ways to adapt architecture and create comfortable conditions in a sharply continental climate. The cities of Northern Kazakhstan at the present stage of development were built largely without taking into account extreme low temperatures, as well as hot and dry hot days. In this regard, the conditions for people to stay in an open architectural environment are very difficult, which implies the need to adapt architecture to harsh climatic conditions. An artificially recreated architectural environment of residential buildings that meets the needs of city residents can become a way to resolve the region's climatic problems. That is, the design of adjoining and yard spaces with an artificially produced microclimate that would organize a comfortable stay in the external architectural environment at any time of the year. In turn, this innovation could create a big leap in the organization and design of the architectural environment of residential buildings in regions with a harsh climate. Organization of artificial microclimate in open space at the present stage of development of construction technologies and building materials is not an unattainable goal, but on the contrary a very relevant phenomenon, especially in the conditions of information and technological progress. The purpose of the study is to determine the ways by which it would be possible to recreate an artificial microclimate in the architectural environment of residential buildings. Creation of favorable conditions for a person to be at any time of the year, in an open urban space. Development of a direction in the design of an architectural environment, dealing with the adaptation of harsh climatic conditions in order to create a favorable microclimate. In the process of research work: theoretical aspects of designing an architectural environment were studied, a retrospective analysis of works related to the organization of a microclimate in harsh weather conditions was carried out. The principles and methods of designing an artificial microclimate in the regional conditions of Northern Kazakhstan were determined. More than 20 public spaces were studied and examined: parks, adjoining spaces and courtyards in such cities as: Astana, Pavlodar and Kostanay.

Keywords: Northern Kazakhstan, artificial microclimate, climatic conditions, architectural environment, microclimate module, living spaces, ETFE membrane.

Введение. Климатические условия Северного Казахстана характеризуются резко континентальным климатом. К основным особенностям климата относятся сухая и холодная зима с умеренным количеством осадков и жаркое сухое лето с большим количеством осадков преимущественно в первом триместре сезона. Большое количество осадков выпадает весной, самые засушливые месяцы – июль и август. Средняя скорость ветра в Северном регионе составляет 4 м/с., максимальная скорость ветра – 31 м/с. Таким образом, анализируя климатические колебания в течение года, можно сделать вывод о том, что внешняя атмосферная среда является крайне суровой для полноценного

круглогодичного нахождения в ней, тем самым подводя внешнюю архитектурную среду к адаптивному подходу, который учел бы все максимальные показатели колебаний температур, силы ветра и осадков.

На современном этапе развития городов Северного Казахстана следует выделить несколько отличительных особенностей проектирования. Города данного региона проектируются без адаптации архитектурной среды к местным климатическим условиям, главным приоритетом является обеспечение горожан жильем, которое бы соответствовало всем теплотехническим нормам. Современное жилье, возводимое в холодных регионах страны, строится с учетом климата, но внешняя архитектурная среда проектируется без расчета на функционирование в холодные и жаркие сезоны года. Иными словами, в городах Северного Казахстана нет необходимых условий для обслуживания пешеходов в холодные и жаркие дни года. К примеру, пространства Астаны и Алматы проектируются в едином типологическом порядке, без учета особенностей климата различных регионов, площадки не адаптируются под региональные условия и представляют собой унитарные сооружения. Другой отличительной особенностью городов северного региона является то, что вектор развития основывается на автомобильном потоке, который мог бы с комфортом перемещать людей в черте города. Повсеместно создаются комфортные условия для автомобилистов, дворы жилых комплексов рассчитаны на большое количество парковочных мест, при этом потребности пешеходов не берутся в расчет, исходя из того, что выгоднее создать комфортные условия для пользования автомобилем, чем для пешехода.

На современном этапе развития архитектурной среды городов требуется изучить вопрос о создании комфортного населенного пункта, который бы мог адаптироваться под суровые климатические условия региона. В первую очередь это изменение вектора развития города в сторону обслуживания пешеходов: сделать городскую среду более экологичной, чистой, менее загазованной и создать комфортные условия для передвижения пешеходов в любое время суток и года. Исходя из данных утверждений, следует организовать современную архитектурную среду жилых образований на основе выработки искусственного микроклимата, который мог бы обслуживать граждан в любое время года. Данное новшество могло бы использоваться в открытых жилых и общественных пространствах, тем самым улучшая микроклимат и позволяя находиться во внешней среде при экстремально низких и высоких температурах.

В 1950-70 годах советскими учеными создавались инновационные проекты городов и жилых комплексов с контролируемым микроклиматом. Данные исследования проводились для покорения арктических регионов, а также улучшения архитектурной среды в Республике Саха (Якутия). Исследования были проведены при программе по освоению Крайнего Севера. Канадскими специалистами были разработаны города с искусственным микроклиматом на территории Аляски и Крайнего Севера. Проекты были разработаны при программе по освоению Аляски и Северных регионов Канады. К сожалению, в 1980 годах вектор исследований ученых поменялся и футуристичные проекты городов с искусственным микроклиматом были забыты и не реализованы.

В данной работе представлена ведущая гипотеза, которая характеризуется созданием микроклиматического модуля. Микроклиматический модуль – это адаптивный подход по созданию контролируемого микроклимата в резко континентальных климатических условиях, позволяющий создать комфортные условия во внешней архитектурной среде.

Литературный обзор. В процессе проведенного исследования были изучены труды авторов, посвятивших ряд научных изысканий теме суровых климатических условий и адаптации архитектуры к ним. Данная тематика является актуальной с середины XX века по наше время.

(Gardner E.A., Arch B. 1958) в своих исследованиях работали над концепцией города, который существовал бы автономно в северных регионах Канады. Проект был одним из футуристических представлений ученых того времени, который мог бы адаптироваться к условиям Крайнего Севера. В нем описана целая экосистема, которая может существовать в искусственном благоприятном климате в суровых условиях Севера.

Вопросы региональных условий и освоение территорий с резко континентальным климатом повлияли на научные исследования ученых того времени. Также указывались работы по освоению купольных пространств в иностранных источниках.

Были предложены концепции по созданию комфортных городов с устойчивой архитектурной средой в суровых климатических условиях. (Kornilova A.A. et.al, 2021) посвятили труды проектированию в региональных условиях Северного Казахстана, в которых не раз говорили о необходимости учета в проектировании региональных условий Севера. Всецело были изучены социальные предпосылки возникновения микроклимата в суровых регионах Северного Казахстана.

В труде (Велли Ю.Я., 1963) «Здания и сооружения на Крайнем Севере» изучались вопросы проектирования и строительства жилых зданий в условиях северных регионов с преобладающими экстремальными низкими температурами. Автор рассуждает на тему архитектурного проектирования в суровых климатических условиях и обсуждает технические решения, которые могут подойти для строительства в резко континентальном климате. (Калеменева Е.А., 2013) изучала в своих трудах купольные сооружения в архитектурной среде города. В работах рассматривается эволюция купольных сооружений, разнообразие и методы использования купольных пространств. Данный материал полезен для проектирования крытых купольных пространств, которые бы могли использоваться для организации микроклимата в северных регионах.

(Anderson, L., & Lee, R., 2020) в своем труде описывают технологии и методы, с помощью которых возможно снизить энергопотребление сооружений в резко континентальном климате. Рассматриваются варианты для улучшения теплоизоляции, использования возобновляемых источников энергии и энергоэффективных строительных материалов. Также описаны строительные нормы и стандарты энергоэффективности в суровых климатических условиях. В пример приведены успешные проекты на территории стран Скандинавии, Канады и Российской Федерации.

Методика исследования. Методы исследования, использованные в данной статье, основываются на ретроспективном анализе литературных источников ближнего и дальнего зарубежья в сфере организации искусственного микроклимата во внешней архитектурной среде придомовых пространств.

В ходе исследования, использовались такие методы, как:

- анализ литературных источников;
- ретроспективный анализ;
- социологическое исследование;
- натурные исследования.

Были проанализированы климатические условия, характерные для городов северных регионов Республики Казахстан. Также выработаны перспективные и прогностические тенденции в проектировании архитектурной среды с контролируемым микроклиматом. Выполнен анализ типовой застройки жилищного фонда городов Северного Казахстана и дана оценка по адаптации архитектурной среды к внешним климатическим условиям региона. Произведен натурный анализ более 10 общественных пространств и придомовых территорий городов Астана, Павлодар и Костанай.

Социологическое исследование было проведено в виде анкетирования жителей города Астаны. Для опроса населения были составлены анкеты с 15 ключевыми вопросами об

архитектурной среде города и местных климатических условиях. В общей сложности было опрошено 100 человек, в процессе опроса были использованы очные и заочные способы анкетирования, обработка результатов проводилась вручную. В результате анкетирования выявлено: 60 % опрошенных считают местный климат крайне суровым, 28 % считают городскую среду умеренно неприспособленной к холодному климату и лишь 12 % утверждают, что местный климат подходит для комфортной жизни.

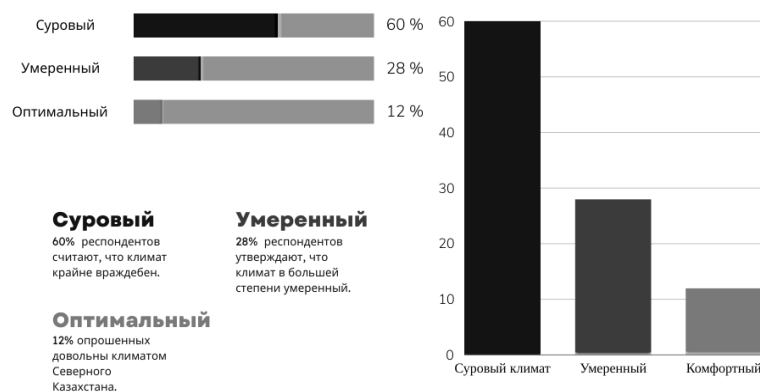


Рисунок 1. Диаграмма социологического опроса

Примечание – составлено авторами

Изучены и проанализированы современные строительные материалы, способные удерживать тепло для создания контролируемого микроклимата, выработана система легких металлических конструкций из металла и ETFE-мембран, которые будут использоваться в организации микроклиматического модуля.

Результаты и обсуждения. В ходе исследования проблем климатических условий в городах северных регионов Республики Казахстан, а также изучив зарубежный опыт проектирования общественных пространств, выработаны методы и рекомендации для создания благоприятных условий нахождения в открытой архитектурной среде в холодное время года, а также при высоких температурных режимах:

1. Создание бесперебойной крытой пешеходной связи между крупными торговыми и развлекательными центрами города. При этом предусматривается создание сети подземных и надземных крытых пешеходных соединений между общественными транспортными узлами и крупными торгово-развлекательными центрами, бизнес-центрами и объектами культуры. Пешеходный поток с помощью данного решения может попасть из одной точки в другую, не выходя на открытый воздух, что увеличит комфорт пеших прогулок зимой в 40-градусный мороз или летом.

2. Изменение подхода к проектированию тротуаров в осенне-зимний и весенний периоды во избежание образования толстого слоя наледи. При этом следует прокладывать трубы с горячей водой под тротуарами. Данная отапливаемая конструкция во время минусовых и нулевых температур поможет избежать множества опасностей и травм (Ivanov P., Petrov T., 2021).

3. Изменение подхода в проектировании придомовых и дворовых пространств: взамен регулярных открытых дворовых пространств нужно проектировать крытую регулируемую и инсолируемую площадь, функционирующую в любое время года как при высоких, так и при низких температурных режимах. Данное решение способствует улучшению нахождения в придомовых и дворовых пространствах. Создание искусственного микроклимата в архитектурной среде жилых образований возможно при организа-

ции всех сопутствующих элементов, таких как создание крытого пространства с помощью металлического каркаса и ETFE-мембран. Многослойная фторполимерная мембрана доказала свою профпригодность в проекте Хан-Шатыр. Данный материал значительно легче стекла, легок в монтаже и стоимость за квадратный метр вдвое меньше, чем у стандартных стеклопакетов. Материал устойчив к резким изменениям температурного режима, характерным для Северного Казахстана.

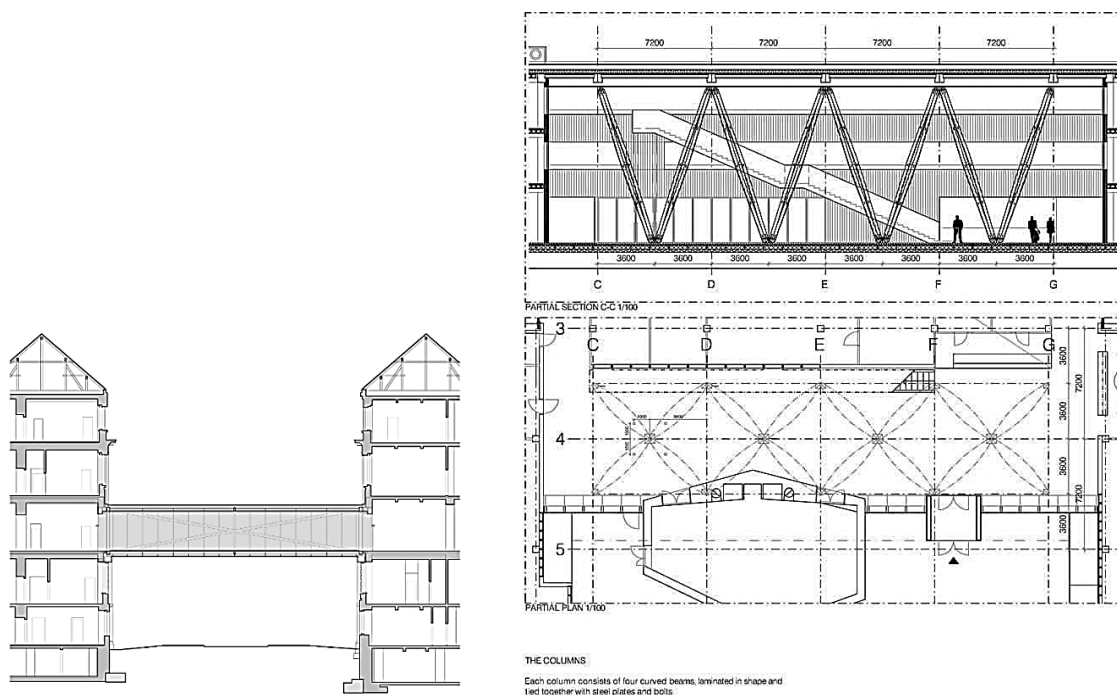


Рисунок 2. Связи между зданиями (теплые мосты) для пешеходов

Примечание – составлено авторами

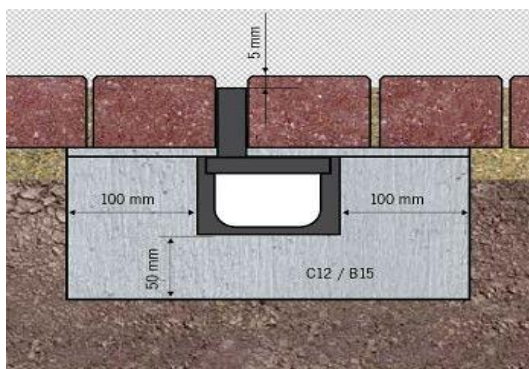


Рисунок 3. Тротуары с подогревом

Примечание – составлено авторами

Изучив принцип работы крытого стадиона, вмещающего в себя не менее 30 тысяч человек, способного обеспечить температуру $+15^{\circ}\text{C}$ в холодный зимний период, следует проектировать крытые дворы с трансформирующимся пространством и внутренней вентиляцией, которая в свою очередь отапливала бы придомовое пространство. Таким

образом, микроклиматический модуль на основе легких конструкций и ETFE-мембран мог бы использоваться в жилых пространствах дворов, при организации зимних садов, проектировании крупных крытых отапливаемых террас и улиц по принципу пассажей.

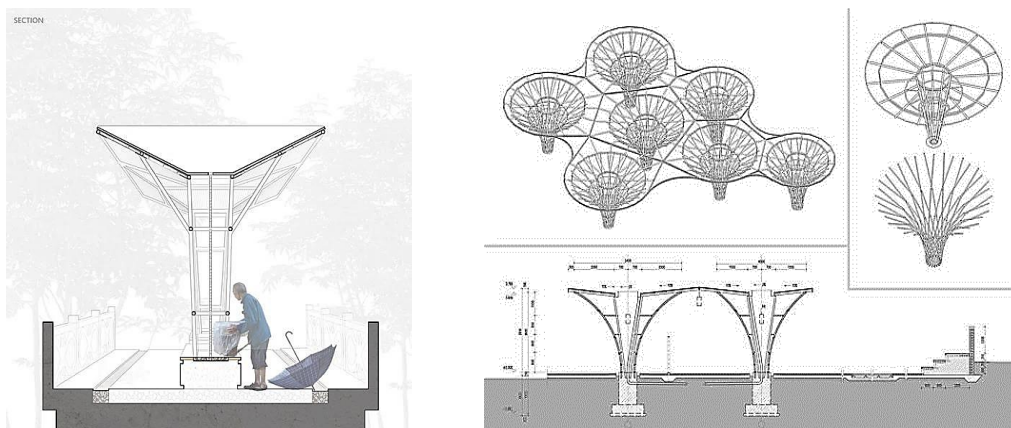


Рисунок 4. Крытые конструкции для защиты от внешних условий климатической среды

Примечание – составлено авторами

Вывод. Проанализировав информацию и главные тезисы исследования, следует принять во внимание то, что на данный момент нет теоретических исследований и литературы по созданию искусственного микроклимата архитектурной среды в климатических условиях Северного Казахстана. Предшествующие исследования в области искусственного микроклимата были ориентированы на регионы Крайнего Севера и разработаны не в полной мере.

В новом витке развития архитектурной среды следует принять во внимание технологический прогресс и сделать уклон на развитие открытых пространств, ориентированных на пешеходов. Предложенный микроклиматический модуль возможно реализовать в полной мере при комплексном технологическом исследовании с учетом инженерной, теплотехнической и экономической частей. Создание искусственного контролируемого микроклимата позволит решить проблемы суровых климатических условий Северных регионов страны, тем самым обеспечив комфортные условия для жителей в любое время года. Достичь плодотворных результатов в создании конструкций для организации искусственного микроклимата в условиях Северного Казахстана поможет:

- организация комплексного исследования городов Северного Казахстана;
- глубокое изучение климатических особенностей каждого региона, составление унифицированных норм и правил касательно проектирования внешней архитектурной среды города, в которую бы вошли открытые общественные пространства, скверы, придомовые территории и т.д.;
- формирование локальных групп в каждом районе с гражданами повышенной социальной ответственности, которые помогли бы в развитии каждого отдельного придомового пространства; следует подключать равнодушные слои общества для обсуждений и помощи в благоустройстве придомовых территорий касательно вопросов озеленения и комфортности времяпровождения в дворовых пространствах;
- создание проектной организации, которая бы занималась проблемами адаптации архитектуры к региональным условиям городов Северного Казахстана;

– адаптация иностранного опыта проектирования в суровых климатических условиях, совместная работа и обмен опытом с международными исследовательскими организациями;

– развитие современных научных проектов, на примере которых можно было бы создать пилотные выпуски зданий и сооружений с новейшими решениями по облагораживанию архитектурной среды. Создание комфортного микроклимата в разрезе внешней архитектурной среды.

Полученный теоретический и эмпирический опыт будет способствовать развитию архитектурной среды Северного региона Казахстана. Архитектурная среда города будет адаптирована под все региональные климатические условия и сможет быть комфортной для всех слоев населения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи. При подготовке данной работы автор(ы) не использовали генеративный ИИ.

Список литературы

- Anderson L., Lee R. (2020). Energy-efficient buildings in cold climates, CRC Press., 45-67
- Brown A., Davis K. (2020). Landscape architecture in cold climates: Design principles, Routledge, 112-130
- Clark L., Taylor R. (2020) Human comfort in cold climate architecture, Elsevier, 78-95
- Donoghue M. (2016). Urban Design Guidelines for Human Wellbeing in Martian Settlements: A thesis in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Urban Planning: / University of Washington. – Washington,
- Dusebaeva K.D., Akasheva A.S. (2014). Ekonomicheskaya i sotsialnaya geografiya Respubliki Kazakhstan [The economic and social geography of the Republic of Kazakhstan]: Study guide, Kazakh university, Almaty, 135
- Gardner E.A., Arch B. Frobisher bay - the design of accommodation for a community of 4500 people (1958), Department of public works building construction branch (1958) <https://assembly.nu.ca/library/Edocs/1959/001419-e.pdf>
- Hansen M., Larsen O. (2022). Cultural identity in cold architecture, 203-220
- Johnson K., Brown M. (2019). Climate-responsive architecture in Arctic, Routledge, 55-72
- Kim D., Park H. (2020). Innovative materials for cold climate construction, Springer, 89-105
- Kornilova A. A., Khorovetskaya Y. M., Abdrashitova T. A., Smagulova A. B., Lapteva I. V. (2021). Modern model of a rural settlement: Development of planning structure and reconstruction of villages, Civil Engineering and Architecture, Vol. 9, No. 1, 214-224. <https://doi.org/10.13189/cea.2021.090118>
- Kuznetsov T., Wilson K. (2020). Historical architecture of northern cities: Preservation and adaptation, Taylor & Francis, 134-150
- Miller J., Petersen S. (2020). Urbanization in Arctic conditions, Springer, 176-192
- Ivanov P., Petrov T. (2021) Urban planning in cold regions: Case studies and best practices, Elsevier, 145-160
- Thompson L., Wilson G. (2021) The impact of climate change on urban planning in northern regions, Springer, 67-82
- Велли Ю.Я. (1963). Здания и сооружения на Крайнем Севере / Ю.Я. Велли, В.В. Докучаев, Н.Ф. Федоров. – Ленинград: Госстройиздат, 492. // Velli Ju.Ja. (1963). Zdanija i sooruzhenija na Krajnem Severe / Ju.Ja. Velli, V.V. Dokuchaev, N.F. Fedorov. – Leningrad.: Gosstrojizdat, 492
- Калеменева Е.А. (2013). Город под куполом: советские архитекторы и освоение Крайнего Севера в 1950-1960-е годы, Academia. Архитектура и строительство. - № 7. – С. 93-108 // Kalemeneva E.A. (2013). Gorod pod kupolom: sovetskie arhitektory i osvoenie Krajnego Severa v 1950-1960-e gody, Academia. Arhitektura i stroitel'stvo. – № 7. – С. 93-108.

Information about authors

Chaly Sultan Iskanderovich – 2nd year PhD student, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical research university, Astana, Kazakhstan, E-mail: Sultan.chaly@gmail.com, +7 771 458 87 13

Kornilova Alla Aleksandrovna – Doctor of Architecture, Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical research university, Astana, Kazakhstan, E-mail: 5328864@mail.ru +7 701 532 88 64

МАЗМҰНЫ

ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС

Абдеев Б.М., Байгереев С.Р., Брим Т.Ф. Серпімді деформацияланатын қатты денелер механикасындағы дене күшінің жаңа түрі	5
Жақыпов Ә.С., Жуманов Т., Аханова Н.Е., Султангазина М.Н., Габдуллин М.Т. Гельмгольц катушка геометриясының магнит өрісінің шамасы мен біртектілігіне әсері	20
Муздыбаева А.С., Машекенова А.Х., Роговский В.В., Яковлев В.С., Мухамедова А.И. ЕРІР халықаралық стандарттарына сәйкес инженерлік қызметкерлерді дайындаудың инновациялық үлгісі	30
Рамазанова Р.А., Шәймәрдан Н., Саурбаева Б.С., Тантыбаева Б.С., Мамяченков С.В. Жәйрем кенорнының тотыққан қорғасын-мырыш кенінің заттық құрамы мен байытылуын зерттеу	39
Рахадиллов Б.Қ., Магазов Н.М., Молбосынов Е.С., Әпсежанова А.Қ., Кусайнов А.Е. Электрдоғалық бүрку кезінде сым беру жылдамдығының жабын құрылымы мен қасиеттеріне әсері	52
Рахымтай Н.Н., Мырзалиев Д.С., Сейтказенова К.К., Кадиров Н.А., Сейдуллаева О.Б. Токарлық өңдеу кезінде соңғы элементтер әдісімен кесу аймағындағы температураны зерттеу	61
Сағыбекова А.О., Мукашев Д.М., Кутлумуратов Б.А. Автомобиль жолдарының таулы учаскелерінде көшкін қаупін тудыратын тау жыныстарының инженерлік-геологиялық ерекшеліктері	71
Сашицкая В.В., Несмеянова Р.М., Масакбаева С.Р. Кокстеу шикізаты мен мұнай коксын күкіртсіздендіру технологияларын талдау	81

АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

Абен А.Б., Жунисов Н.М., Казбекова Г.Н., Аманов А.Н., Абибуллаева А.А. Қант диабетін анықтауда машиналық оқыту алгоритмдерін қолдану	92
Акылбеков О.Н., Касенхан А.М., Байдильдинова С.Т. Білім берудегі ЖИ әдістері: ғаламдық шолу және Қазақстандағы қолданылуы	103
Жетписбаева А.Т., Медетов Б.Ж., Ахмедиярова А.Т., Хамзина Б.Е., Үрістимбек Г.Қ. Заманауи компьютерлік технологияларды қолдана отырып, физикалық құбылыстарды зерттеуге арналған зертханалық қондырғыларды зерттеу және әзірлеу	114
Жомартқызы Г., Павелов К.А., Базарова М.Ж. Математикалық жиынды және Левенштейн алгоритмі негізінде деректер құрылымдарының жинақтылығын бағалайтын салыстырмалы талдау	123
Казиева Н.М., Оспанов Р.М., Зернов Д.Ю., Калиев А.К. Таратылған тізілім технологияларына негізделген гибридті биометриялық жүйелерді жобалаудың заманауи тәсілдері	131
Красавин А.Л., Назенова Г.М., Алонцева Д.Л., Асқадұлы Қ. Дөңгелекті мобилді роботтың қозғалыс траекториясын модельдеу	144
Құмарқанова А.С., Танкибаева А.К., Тлебалдинова А.С., Карменова М.А., Кумаргажанова С.К. Сүзгілеу және сапаны бағалау негізінде MPT кескіндерін өңдеудің кешенді тәсілі	153
Құрметқан Т., Мамырбаев Ә.Ж. Қазақ сөйлеулерін тануда Transformer моделінің жетілдірген түрлерін қолдану ерекшеліктері	163
Лопаткин Д.В., Рохас Криулло Н.П., Котлярова И.А., Попова Г.В., Вайс Ю.А. Сұрақтарды автоматты түрде генерациялау саласындағы жетістіктер: сұрақтарды автоматты түрде генерациялау әдістеріне, деректер жиынтығына және бағалауға шолу	172
Оралбекова Д.О., Мамырбаев О.Ж., Имансакипова А.Б., Жигер А.Ж., Мухсина К.Ж. NER деректер жинасын пайдалану негізінде көпөлшемді жіктелу мәселелерінің LSTM және BERT моделін салыстырмалы зерттеуі	182

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС

Әбу А.З., Кабиев А.С., Ержұманова Ұ.С. Іргетастың отыруын Plaxis 2D бағдарламасы арқылы есептеу	193
Галымжанова Д.Н., Тілекқабыл А.Ж., Ескалиев М.Ж., Сактаганова Н.А., Жапахова А.У. Өздігінен нығыздалатын бетонның қасиеттеріне табиғи цеолиттердің әсері	201
Есенгабулов С.К., Кожамет М.С., Жаркенов Е.Б., Абаканов Е.Н., Жанкелді М. Жарықөткізгіш құрылымдардың жылу сипаттамаларын бағалау және талдау	212
Кайдаров А.Ш., Карабаев Г.А., Мамедов С.Э. Қасбеттердің клинингі – қаланың эстетикалық келбетін сақтау ретіндегі әдіс	226
Нургожина М., Абдрахманова Б., Chang Der-Wen, Omarov A., Жұмаділов І. CFA қадаларын сандық модельдеу нәтижелерін және статикалық сынау жүктемелерімен салыстырмалы талдау	235
Сарсембаева Д.Е. Астана қаласының құрылымындағы әлеуметтік инфрақұрылымының ірі сауда нысандары	245
Сейтенова Г.Ж., Сыздық А.Ғ., Дюсова Р.М., Конканов М.Ж., Джексембаева А.Е. Полимер битумын дайындауға арналған отандық қоспалардың тозу процестерін зерттеу	259
Серікова А.Р., Иноземцева Т.А., Феоктистова Е.А. Қазіргі Қазақстан аумағындағы өнеркәсіптік архитектураның даму ерекшеліктері	271
Тлегенов Р.Б., Ниязбекова Р.К., Алдабергенова С.С., Джексембаева А.Е., Конканов М.Д. Астанадағы жылу электр станциясынан ұшатын күл толтырғышының негізіндегі полимерлі бетонның жылу өткізгіштігі	281
Чалы С.И., Корнилова А.А. Солтүстік Қазақстандағы тұрғын орталарының сәулеттік ортасындағы басқарылатын микроклимат	290

СОДЕРЖАНИЕ

ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Абдеев Б.М., Байгереев С.Р., Брим Т.Ф. Новый вид объемной силы в механике упруго-деформируемого твердого тела	5
Жақыпов Ә.С., Жуманов Т., Аханова Н.Е., Султангазина М.Н., Габдуллин М.Т. Влияние геометрии катушки гелимгольца на величину и однородность магнитного поля	20
Муздыбаева А.С., Машекенова А.Х., Роговский В.В., Яковлев В.С., Мухамедова А.И. Инновационная модель обучения инженерных кадров по международным стандартам EIPR	30
Рамазанова Р.А., Шәймәрдан Н., Саурбаева Б.С., Тантыбаева Б.С., Мамяченков С.В. Исследование вещественного состава и обогатимости окисленной свинцово-цинковой руды месторождения Жайрем	39
Рахадиллов Б.К., Магазов Н.М., Молбосынов Е.С., Апсежанова А.К., Кусайнов А.Е. Влияние скорости подачи проволоки на структуру и свойства покрытий при электродуговом напылении	52
Рахымтай Н.Н., Мырзалыев Д.С., Сейтказенова К.К., Кадилов Н.А., Сейдуллаева О.Б. Исследование температуры в зоне резания методом конечных элементов при токарной обработке	61
Сагыбекова А.О., Мукашев Д.М., Кутлумуратов Б.А. Инженерно-геологические особенности горных пород, вызывающие оползневые опасности на горных участках автомобильных дорог	71
Сашицкая В.В., Несмеянова Р.М., Масакбаева С.Р. Анализ технологий обессеривания сырья коксования и нефтяного кокса	81

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Абен А.Б., Жунисов Н.М., Казбекова Г.Н., Аманов А.Н., Абибуллаева А.А. Использование алгоритмов машинного обучения для выявления диабета	92
Акылбеков О.Н., Касенхан А.М., Байдильдинова С.Т. Методы ИИ в образовании: глобальный обзор и примеры применения в Казахстане	103
Жетписбаева А.Т., Медетов Б.Ж., Ахмедиярова А.Т., Хамзина Б.Е., Үрістимбек Г.Қ. Исследование и разработка лабораторных установок для изучения физических явлений с применением современных компьютерных технологий	114
Жомартқызы Г., Павлов К.А., Базарова М.Ж. Сравнительный анализ оценки схожести структур данных с использованием математических множеств и алгоритма Левенштейна	123
Казиева Н.М., Оспанов Р.М., Зернов Д.Ю., Калиев А.К. Современные подходы к проектированию гибридных биометрических систем, на основе технологий распределенного реестра	131
Красавин А.Л., Назенова Г.М., Алонцева Д.Л., Асқадұлы Қ. Моделирование траектории движения колесного мобильного робота	144
Құмарқанова А.С., Танкибаева А.К., Тлебалдинова А.С., Карменова М.А., Кумаргажанова С.К. Комплексный подход к предобработке MPT-изображений на основе фильтрации и оценки качества	153
Құрметқан Т., Мамырбаев Ө.Ж. Особенности использования расширенных форм модели Transformer в распознавании казахской речи	163
Лопаткин Д.В., Рохас Криулко Н.П., Котлярова И.А., Попова Г.В., Вайс Ю.А. Достижения в области автоматической генерации вопросов: обзор методов, наборов данных и оценок автоматической генерации вопросов	172
Оралбекова Д.О., Мамырбаев О.Ж., Имансакипова А.Б., Жигер А.Ж., Мухсина К.Ж. Сравнительное исследование моделей LSTM и BERT для задач мультиклассификации с использованием набора данных NER	182

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

Әбу А.З., Кабиев А.С., Ержұманова Ұ.С. Расчет осадки фундамента с помощью программы Plaxis 2D	193
Галымжанова Д.Н., Тілекқабұл А.Ж., Ескалиев М.Ж., Сактаганова Н.А., Жапахова А.У. Влияние природных цеолитов как наполнителя на свойства самоуплотняющегося бетона	201
Есенгабулов С.К., Кожахмет М.С., Жаркенов Е.Б., Абаканов Е.Н., Жанкелді М. Оценка и анализ теплотехнических характеристик светопрозрачных конструкций	212
Кайдаров А.Ш., Карабаев Г.А., Мамедов С.Э. Клининг фасадов, как метод сохранения эстетического облика города	226
Нургожина М., Абдрахманова Б., Chang Der-Wen, Отаров А., Жұмаділов І. Сравнительный анализ результатов численного моделирования и статических нагрузок испытаний свай CFA	235
Сарсембаева Д.Е. Крупные торговые объекты социальной инфраструктуры в структуре города Астаны	245
Сейтенова Г.Ж., Сыздық А.Г., Дюсова Р.М., Конканов М.Ж., Джексембаева А.Е. Исследование процессов старения отечественных добавок для приготовления полимербетона	259
Серікова А.Р., Иноземцева Т.А., Феоктистова Е.А. Особенности развития промышленной архитектуры на территории современного Казахстана	271
Тлегенов Р.Б., Ниязбекова Р.К., Алдабергенова С.С., Джексембаева А.Е., Конканов М.Д. Теплопроводность полимерного бетона на основе заполнителя из летучей золы с тепловой электростанции в Астане	281
Чалы С.И., Корнилова А.А. Контролируемый микроклимат в архитектурной среде жилых образований Северного Казахстана	290

CONTENT

ENGINEERING AND ENGINEERING

Abdeyev B.M., Baigereyev S.R., Brim T.F. A new type of body force in the mechanics of elastically deformable solids	5
Zhakypov A.S., Zhumanov T.N., Akhanova N.Y., Sultangazina M.N., Gabdullin M.T. The influence of helmholtz coil geometry on the magnitude and homogeneity of the magnetic field	20
Muzdybayeva A., Mashekenova A., Rogovsky V., Yakovlev V., Mukhamedova A. Innovative model of engineering personnel training according to EPIP international standards	30
Ramazanov R.A., Shaimardan N., Saurbayeva B.S., Tantybayeva B.S., Mamyachenkov S.V. Study of the material composition and enrichment of oxidized lead-zinc ore of the Zhairam deposit	39
Rakhadilov B.K., Magazov N.M., Molbossynov Y.S., Apsezhanova A.K., Kussainov A.Y. Effect of wire feed rate on the structure and properties of coatings in the electric arc spraying process	52
Rakhymtay N.N., Myrzalyiev D.S., Seitkazenova K.K., Kadirov N.A., Seydullayeva O.B. Investigation of the temperature in the cutting zone by the finite element method during turning	61
Sagybekova A.O., Mukashev D.M., Kutlumuratov B.A. Engineering-geological features of rocks causing landslide hazards on sections of mountain roads	71
Sashitskaya V.V., Nesmeyanova R.M., Masakbaeva S.R. Analysis of technologies for desulfurization of coking feedstock and petroleum coke	81

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Aben A.B., Zhunisov N.M., Kazbekova G.N., Amanov A.N., Abibullayeva A.A. Use of machine learning algorithms in diabetes detection	92
Akylbekov O.N., Kasenkhan A.M., Baidildinova S.T. AI techniques in education: a global overview and applications in Kazakhstan	103
Zhetpisbayeva A., Medetov B., Akhmediyarova A., Khamzina B., Uristimbek G. Research and development of laboratory installations for studying physical phenomena using modern computer technologies	114
Zhomartkyzy G., Pavlov K.A., Bazarova M.Zh. Comparative analysis of the evaluation of the convergence of data structures using mathematical sets and the Levenshtein algorithm	123
Kaziyeva N., Ospanov R., Zernov D., Kaliyev A. Modern approaches to the design of hybrid biometric systems based on distributed registry technologies	131
Krasavin A.L., Nazenova G.M., Alontseva D.L., Askaduly K. Trajectory tracking simulation of a wheeled mobile robot	144
Kumarkanova A.S., Tankibayeva A.K., Tlebaldinova A.S., Karmenova M.A., Kumargazhanova S.K. Comprehensive approach to MRI image preprocessing based on filtering and quality assessment	153
Kurmetkan T., Mamyrbayev O.Zh. Features of using extended forms of the Transformer model in kazakh speech recognition	163
Lopatkin D.V., Rokhas Kriulko N.P., Kotlyarova I.A., Popova G.V., Vais Y.A. Advances in automatic question generation: a survey of automatic question generation techniques, datasets, and evaluation	172
Oralbekova D., Mamyrbayev O., Imansakipova A., Zhiger A., Mukhsina K. A comparative study of LSTM and BERT models for multi-classification tasks using NER dataset	182

ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

Abu A.Z., Kabiye A.S., Yerzhumanova U.S. Calculation of foundation precipitation using the plaxis 2d program	193
Galymzhanova D., Tilekkabyl A., Yeskaliyev M., Saktaganova N., Zhapakhova A. Effect of natural zeolites on the properties of self-compacting concrete	201
Yessengabulov S., Kozhakhmet M.S., Zharkenov Ye.B., Abakanov Ye., Zhankeldi M. Evaluation and analysis of thermal characteristics of transparent structures	212
Kaidarov A.Sh., Karabayev G., Mamedov S. Facade cleaning as a method of preserving the aesthetic appearance of a city	226
Nurgozhina M., Abdrakhmanova B., Chang D-W., Omarov A., Zhumadilov I. Comparative analysis of numerical modeling and static pile load test results for CFA piles	235
Sarsembayeva D.Ye. Large social infrastructure retail facilities in the structure of Astana city	245
Seitenova G.Z., Syzdyk A.G., Dyussova R.M., Konkanov M.Z., Dzheksembaeva A.E. Study of aging processes of domestic additives for the preparation of polymer bitumen	259
Serikova A., Inozemtseva T.A., Feoktistova E.A. Industrial architecture development features in modern Kazakhstan	271
Tlegenov R.B., Niyazbekova R.K., Aldabergenova S.S., Jexembayeva A.E., Konkanov M.D. Thermal conductivity of polymer concrete based on aggregate from fly ash from thermal power plant in Astana	281
Chaly S.I., Kornilova A.A. Controlled microclimate in the architectural environment of residential formation in Northern Kazakhstan	290

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің ХАБАРШЫСЫ

Ғылыми журнал

1999 жылдан шыға бастады.

Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінде тіркеліп,
2024 ж. 3 мамырында № KZ71VPY00092356 куәлігі берілген.

ВЕСТНИК Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева

Научный журнал

Издается с 1999 г.

Зарегистрирован Министерством информации и общественного развития
Республики Казахстан. Свидетельство № KZ71VPY00092356 от 3 мая 2024 г.

BULLETIN of D. Serikbayev East Kazakhstan technical university

Scientific journal

Published since 1999

Registered by the Ministry of Information and Social Development
Republic of Kazakhstan. Certificate No. KZ71VPY00092356 dated May 3, 2024.

Редакторлар – Редакторы

О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова

Корректорлар – Корректоры

О.Н. Николаенко, С.С. Мамыраздыкова

Руководитель издательства О.Н. Николаенко

Editors O. Nikolaenko, S. Mamyrazdykova

Copy editors O. Nikolaenko, S. Mamyrazdykova

Publishing director O. Nikolaenko

Материалдарды компьютерде терген және беттеген С.С. Мамыраздыкова

Набор, верстка, изготовление оригинал-макета С.С. Мамыраздыкова

Text Layout, lead out production of the original layout S. Mamyrazdykova

Басуға 27 маусым 2025 ж. қол қойылды.

Форматы 84×108/16. Офсет қағазы.

Көлемі: шартты баспа табағы 31,92, есептік баспа табағы 31,97.

Баспа нұсқасы. Таралымы 50 дана. № 555-2025 тапсырыс.

Бағасы келісім бойынша.

Подписано в печать 27 июня 2025 г.

Формат 84×108/16. Бумага офсетная.

Объем: усл. печ. л. 31,92, уч.-изд. л. 31,97.

Печатная версия. Тираж 50 экз. Заказ № 555-2025.

Цена договорная.

Signed to print on June 27, 2025.

Format 84'108 / 16. Offset paper.

Volume: conventional printing plate 31.92, estimated printing plate 31.97.

Printed version. Circulation 50 copies. Order No. 555-2025.

The price is negotiable.

Шығыс Қазақстан техникалық университеті. 070004, Өскемен қаласы, Протозанов көшесі, 69.
Восточно-Казахстанский технический университет. 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69.
D. Serikbayev East Kazakhstan technical university. 070004, Ust-Kamenogorsk, 69 Protozanov Street.