

Регистрационный
№ KZ71VPY00092356

ISSN 1561-4212
ISSN 2789-8210 (Online)
№ 1(107), март, 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 Mlynček, 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)
Jarosław 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

МЕТАЛЛУРГИЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ
METALLURGY

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_5
IRSTI 53.49.21

I.K. Abizhanova¹, D.B. Buitkenov², N.M. Magazov¹, A.E. Kusainov¹, S.A. Abdulina¹

¹D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

E-mail: www.indiko@mail.ru*

E-mail: magazovn@gmail.com

E-mail: arys20055@gmail.com

E-mail: abdulina.saule@mail.ru

²S. Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

E-mail: buitkenovd@mail.ru

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE SPRAYING DISTANCE ON THE PROPERTIES OF Cr₃C₂-NiCr METAL-CERAMIC COATINGS OBTAINED BY THE HVOF METHOD

HVOF ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН Cr₃C₂-NiCr МЕТАЛЛ КЕРАМИКАЛЫҚ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ
ҚАСИЕТТЕРІНЕ БҮРКУ ҚАШЫҚТЫҒЫНЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДИСТАНЦИИ НАПЫЛЕНИЯ
НА СВОЙСТВА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ Cr₃C₂-NiCr,
ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ HVOF

Abstract. In this paper, Cr₃C₂-NiCr metal-ceramic coatings obtained by high-velocity oxygen fuel spraying (HVOF) at various spraying distances are studied. A detailed morphological characterization of the cross section of the coatings was carried out using scanning electron microscopy (SEM) with backscattered electrons (BSE). It was found that the particle size of chromium carbide Cr₃C₂ varies depending on the deposition distance. Morphology analysis also revealed the distribution of pores, which is important for the wear resistance of coatings. It was also discovered that as the spraying distance increases, the surface roughness of the coatings also increases. Hardness tests indicated that the coating hardness is influenced by the level of decarburization and can be associated with the kinetic energy of the particles and the density of dislocations in the coating. Furthermore, the impact of spraying distance on the friction coefficient of the coatings was examined, which is essential for optimizing their performance in wear conditions. These results can be useful in the development and optimization of cermet coatings to increase their wear resistance and efficiency in various industrial conditions.

Keywords: HVOF; cermet coatings; Cr₃C₂-NiCr; microstructure; hardness; SEM analysis; coefficient of friction; surface roughness.

Аңдатпа. Бұл мақалада әртүрлі бүрку қашықтықтарында жоғары жылдамдықты оттегі-отынды бүрку (HVOF) әдісімен алынған Cr₃C₂-NiCr металл керамикалық жабындары зерттелген. Кері шашыраңқы электрондары (BSE) бар сканерлеуші электронды микроскопияны (SEM) пайдалана отырып, жабындардың көлденең қимасының егжей-тегжейлі морфологиялық сипаттамасы жасалды. Cr₃C₂ бөлшектерінің мөлшері бүрку қашықтығына байланысты өзгеретіні анықталды. Морфологияны талдау жабындардың тозуға төзімділігіне әсер ететін кеуектердің таралуын анықтады. Сондай-ақ, бүрку қашықтығы ұлғайған сайын жабын бетінің кедір-бұдырлығы ұлғаятындығы анықталды. Жабындардың қаттылығын өлшеу жабындардың қаттылығы декарбонизация дәрежесіне байланысты екенін және бөлшектердің кинетикалық

энергиясына және жабындағы дислокация мөлшеріне байланысты болуы мүмкін екенін көрсетті. Сонымен қатар, тозу жағдайында қолдануды оңтайландыру үшін маңызды бүрку қашықтығының жабындардың үйкеліс коэффициентіне әсері зерттелді. Бұл нәтижелер әртүрлі өнеркәсіптік жағдайларда олардың тозуға төзімділігі мен тиімділігін арттыру үшін металл керамикалық жабындарды жобалау және оңтайландыру кезінде пайдалы болуы мүмкін.

Түйін сөздер: жоғары жылдамдықты оттегі-отынды бүрку; металл керамикалық жабын; $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$; микроқұрылым; қаттылық; СЭМ талдау; үйкеліс коэффициенті; беттің кедір-бұдырлығы.

Аннотация. В данной статье исследованы металлокерамические покрытия $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$, полученные методом высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF) при различных дистанциях напыления. С использованием сканирующей электронной микроскопии (SEM) с обратной рассеянными электронами (BSE) была проведена детальная морфологическая характеристика поперечного сечения покрытий. Установлено, что размер частиц карбида хрома Cr_3C_2 варьируется в зависимости от расстояния напыления. Анализ морфологии также позволил выявить распределение пор, что имеет значение для износостойкости покрытий. Также было обнаружено, что с увеличением расстояния напыления увеличивается шероховатость поверхности покрытий. Измерение твердости покрытий показало, что она зависит от степени обезуглероживания и может быть связана с кинетической энергией частиц и количеством дислокаций в покрытии. Кроме того, исследовано влияние расстояния напыления на коэффициент трения покрытий, что важно для оптимизации их применения в условиях износа. Эти результаты могут быть полезны при разработке и оптимизации металло-керамических покрытий для повышения их износостойкости и эффективности в различных промышленных условиях.

Ключевые слова: высокоскоростное кислородно-топливное напыление; металло-керамические покрытия; $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$; микроструктура; твердость; СЭМ анализ; коэффициент трения; шероховатость поверхности.

Introduction. In the world, 90% of steel is produced by using continuous casting machines. The liquid steel directed into the continuous casting machine is poured from the ladle into the intermediate ladle, and then from the intermediate ladle into the mold, as a result of which the steel crystallizes with a certain thickness of the shell taking the form of a mold (Liu, Zhu and Li, 2019a).

The crystallizer must withstand all-round mechanical and thermal loads (Moro et al., 2017; Ryu et al., 2023). For this reason, very high demands are placed on the strength, thermal conductivity, wear resistance and resistance to high-temperature corrosion of the mold surface.

The material (copper) of the copper crystallizer has low mechanical strength and quickly fails. Extremely high temperature on the hot surface in the meniscus area causes swelling of the form (Velicka et al., 2009; Moro et al., 2019). Instability of the meniscus flow can lead to uneven heat transfer, in addition to trapping mold flux in the solidifying shell (Swain et al., 2023). Therefore, in order to avoid very dangerous damage that can lead to failure of the continuous caster, it is necessary to strengthen the surface of the mold.

The most promising direction to reduce the intensity of wear of the working walls of the mold is currently the application of protective coatings (Novak et al., 2018). The coating process on the surface of the mold mainly includes electroplating, thermal spraying and laser surfacing (Liu, Zhu and Li, 2019a).

However, the electroplating and laser cladding method has a number of disadvantages. Such as high power consumption, waste plating fluid contamination and high cooling rate, which may lead to internal cracking of the coating (Berger, 2015; Boelli, L.-M. Berger, et al., 2016).

In this regard, new technologies for surface treatment are being actively developed. Among them, thermal spraying technology is an effective method for applying heat-resistant and resistant materials to the surface of metallurgical equipment. Different thermal spraying methods are used to apply protective coatings, such as plasma spraying, arc spraying, cold spray coating and high-velocity oxygen fuel (HVOF) (J.G. La Barbera-Sosa et al., 2010). HVOF

coating has more advantages compared to other thermal spraying technologies, because it is possible to achieve lower porosity, good adhesive strength, high hardness and density (Akhtari Zavareh et al., 2015). The method allows you to control the thickness of the coating and apply a wear-resistant coating only to the lower, most worn part of the mold.

The main most suitable materials for spraying with HVOF technology are WC-Co (Guilemany et al., 1997; Akhtari Zavareh et al., 2015) and NiCr-Cr₃C₂ (Zhu, Wang and Lu, 2019; Govande et al., 2022). However, Cr₃C₂-25NiCr coatings are more suitable for crystallizer operating conditions and can be used at temperatures below 930°C (Liu, Zhu and Li, 2019b; Yang et al., 2022). Cr₃C₂-NiCr provides sufficient resistance to oxidation at intense and consistently high temperatures with taking into account the Cr₂O₃ layer (Alroy, Kamaraj and Sivakumar, 2023).

In (Du et al., 2019; Ham et al., 2021; Zhang et al., 2021; Rubino et al., 2023), the coating qualities of Cr₃C₂-NiCr powder obtained by different technologies were studied. Compared to other thermal spraying technologies, high-speed oxygen-fuel spraying has proven to be a simple and effective way to improve wear resistance. However, the production of high-quality coatings depends not only on the technology employed but also on the HVOF spray system and the parameters used during spraying. The authors (Zimmermann and Kreye, 1996) conducted experiments with high-speed oxygen-fuel (HVOF) with Diamond Jet (DJ) 2600 and 2700, P-5000, Jet Kote and Top Gun with changes in particle velocity to study their effect on the microstructure and properties of Cr₃C₂-NiCr coatings. The results show that Cr₃C₂-NiCr coatings of high density, high adhesion strength and high wear resistance can be obtained with all HVOF systems used. However, the microstructure and properties of the coatings are primarily influenced by the extent of oxidation and carbon loss in the material during the spraying process (Matikainen, Koivuluoto and Vuoristo, 2020; Mahade et al., 2021; Shi et al., 2022; Ozkan, 2023). The author of the literature (Maheshwaran et al., 2022) also identified that the flow rate is the most influential factor in these processes of sprayed HVOF, followed by the powder feed rate, spray distance and oxygen flow rate.

Autors 0 compared the particle flight properties and coating characteristics of powders under different process parameters. They found that for Cr₃C₂-NiCr powder, the particle velocity increased with lower fuel consumption and shorter spray distance. As the particle velocity increased, the deposition efficiency decreased. Shorter particle residence time in the hot stream resulted in a lower melting rate and a higher probability of particle rebound at high velocities.

Based on this, the importance of the correct selection of the spraying parameter is determined. The process parameters are independent variables, and their result consists of dependent variables, including thickness, porosity, hardness, toughness, wear, corrosion, and oxidation resistance.

Currently, the actual proportion of applying thermally sprayed coatings to continuous casting crystallizers does not exceed 5% (Guilemany et al., 1997). Thus, the promotion and application of thermal coatings on production sites mainly depends on the improvement of auxiliary coating equipment and precise control of the parameters of the coating process.

This article focuses on the optimization of the coating process, aimed at improving the surface properties of molds. HVOF coatings require the selection of optimal spray modes. HVOF Termika-3 equipment, located in the scientific and production company “Plasma-Science” LLP (Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan), will be used to carry out experimental work.

Materials and methods of research. In the present study, Cr₃C₂-NiCr powder (75/25) with particle size ranging from 20 to 32 μm was used to coat copper samples. Before coating, the substrate surfaces were polished with MIRKA sandpaper to a grain size of 2500 to achieve a uniform and even surface. Then they were sandblasted for better adhesion of the sprayed coating.

The HVOF TERMIKA-3 installation (Plasmacenter, St.Petersburg, Russia) was used as the spraying equipment. Three coatings with varying spraying distances were obtained: L_1 – 200 mm, L_2 – 250 mm, L_3 – 300 mm.

To identify the phase composition of the coating, X-ray diffraction analysis (XRD) was performed. An X'PertPro X-ray diffractometer (Philips Corporation, Eindhoven, the Netherlands) with a Cu-K α anode ($\lambda = 0.154$ nm) was used for this purpose. The following parameters were used: tube voltage $U = 40$ kV, tube current $I = 30$ mA. Analysis and processing were performed using OriginPro software. Data were collected in the 2θ range from 20° to 90° with a step of 0.02° and a counting time of 1 second per step.

The coatings microstructural features were characterized using scanning electron microscopy (TESCAN VEGA 3 LMH, Czech Republic) with magnifications of 1650x and 5000x. The metallographic microscope Altami MET 5C (OOO Altami, St. Petersburg, Russia) was used to evaluate porosity.

The surface roughness (R_a) of the coatings was measured for each sample in five measurements using a model 130 profilometer (PROTON, Moscow, Russia).

Using a FISCHERSCOPE HM2000 S (Helmut Fischer GmbH, Germany), the mechanical properties of the samples were measured at a load of 2000 mN and an exposure time of 20 seconds.

Tribological friction tests were carried out on a TRB3 tribometer using the standard ball-on-disk method. The counterbody was made of 100Cr6 coated steel, with a load of 6 N and a friction path of 100 m.

Results and discussion. Figure 1 shows a Cr_3C_2 -NiCr powder with an almost spherical morphology consisting of a subset of agglomerate particles. An analysis of the literature confirms the presence of Ni in the light gray zone as an agglomerating phase in irregularly shaped areas connecting chromium carbide particles that look like dark gray zones.

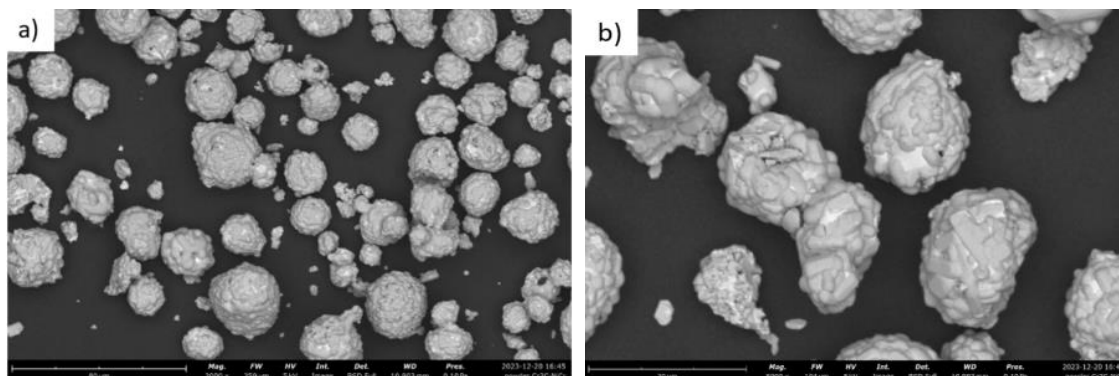


Figure 1. Morphology of Cr_3C_2 -NiCr powder: a) 1650x; b) 5000x;

Note – compiled by the authors

Figure 2 shows the X-ray images of the original Cr_3C_2 -25NiCr powder and L_1 , L_2 and L_3 coatings. Two main phases can be detected in the initial powder: (1) binding $CrNi_3$, which provides high adhesion strength as well as fracture toughness, and (2) solid Cr_3C_2 , which provides higher hardness and wear resistance. The carbide phases Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_6$ were found in the coating formed during decarburization of Cr_3C_2 . Similar phases have been found in other works (He and Lavernia, 2001; Hou et al., 2004; Akhtari Zavareh et al., 2015; Bolelli, L. M. Berger, et al., 2016a; Wang et al., 2016; Ke et al., 2017; Matikainen, Koivuluoto and Vuoristo, 2020; Ham et al., 2021).

Decarburization of Cr_3C_2 indicated the influence of deposition parameters on the phase structure of the coating. The L_1 coating contains more of the Cr_3C_2 phase, which means relatively little decarburization of Cr_3C_2 to Cr_7C_3 . The high percentage of preserved Cr_3C_2 grains was obvious. The crystal peaks of this phase were clearly expressed on the diffractogram. Given the temperature regime, HVOF can melt NiCr and a small amount of Cr_3C_2 , and a new phase is formed less.

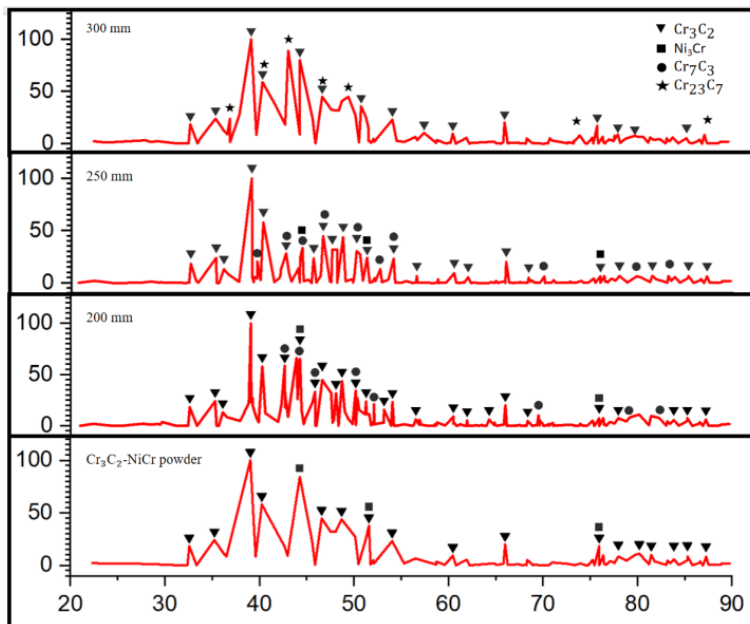


Figure 2. X-ray images of the initial Cr_3C_2 -NiCr powder and coatings with spray distances $L_1=200$ mm, $L_2=250$ mm and $L_3=300$ mm

Note – compiled by the authors

It is noticeable that with a decrease in the spray distance, the intensity of the peaks of chromium carbide Cr_3C_2 increases (Figure 2). Moreover, the NiCr binding phase was not detected in the L_3 sample. Instead of this phase, Cr_{23}C_6 was formed due to decarburization of the carbide phase. Mohanty et al. (Muthu et al., 2020) also noted a phase change from Cr_3C_2 to Cr_{23}C_6 during sputtering. This can be explained by long exposure to flame (Muthu et al., 2020). Another reason may be the high speed of the particle spraying process.

However, according to Zimmerman and Kreye (Zimmermann and Kreye, 1996), the presence of in the deposited coating cannot be confirmed solely by X-ray diffraction, since the main diffraction peaks of Cr_7C_3 and Cr_{23}C_6 coincide with the lines associated with NiCr and Cr_3C_2 . In addition, the decarburization of Cr_3C_2 is apparently associated with the heating of Cr_3C_2 spray particles. As confirmed by the results of previous studies, the main cause of carbon loss and changes in the content of carbides is the rebound of Cr_3C_2 particles during coating formation (Sahraoui, N. E. Fenineche, et al., 2003). It should also be remembered that X-rays penetrate only about 5 microns of the coating.

Figure 3 shows the morphology of the cross – section of coatings obtained at different spraying distances: $L_1 – 200$ mm; $L_2 – 250$ mm; $L_3 – 300$ mm. The morphology of the cross-section of all coatings was analyzed using SEM using backscattered electron imaging (BSE). For convenience, the analysis was carried out at various magnifications to obtain more detailed information about the structure of the coating and assess its characteristics.

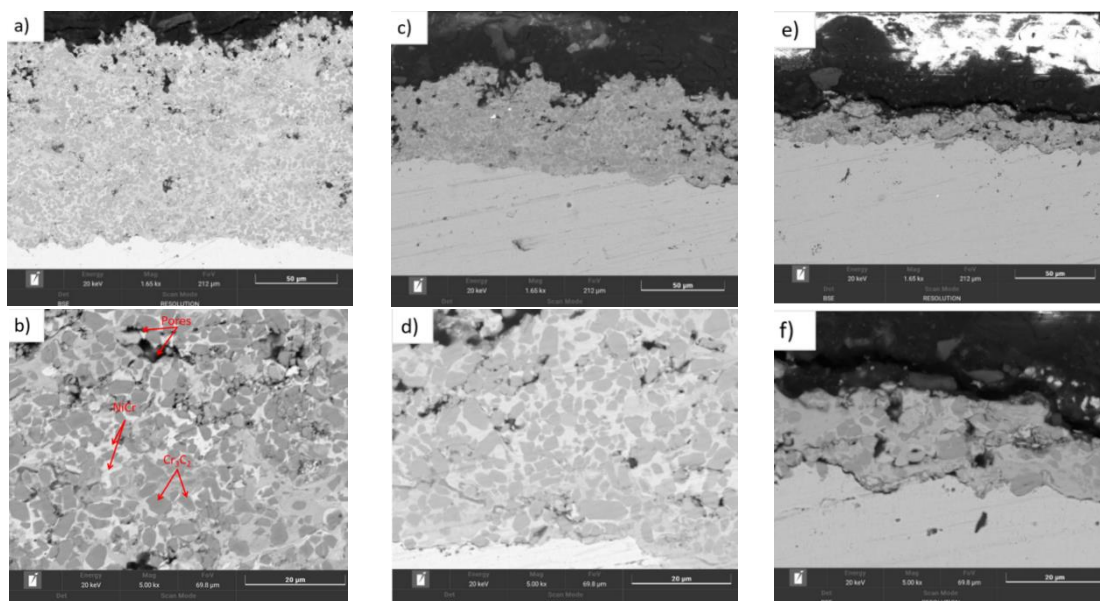


Figure 3. SEM images of the morphology of the cross-section of Cr_3C_2 -NiCr coatings obtained by changing the deposition distance. (a,b) 200 mm; (c,d) 250 mm; (e,f) 300 mm

Note – compiled by the authors

According to (Bolelli, L. M. Berger, et al., 2016b; Rovatti et al., 2017; Ke et al., 2019; Ozkan, 2023; Rubino et al., 2023), dark gray contrast particles are relatively evenly distributed throughout the coating; it is assumed that this is the Cr_3C_2 phase. The lighter gray matrix is presumably a matrix with a high nickel content. The phase of the cermet coating was NiCr with embedded Cr-based carbide. The reason is that the sprayed powder for the cermet coating was formed from small particles of NiCr- Cr_3C_2 agglomerate mixed with NiCr alloy powder, and the melting point of Cr_3C_2 is higher than that of NiCr. The high-magnification image in Figure 3b shows that the size of dark gray contrast particles ranges from about 4.3 microns for L_1 , 4.4 microns for L_2 and 3.8 microns for L_3 . There is evidence of a small amount of small-scale porosity (small black elements), with an average value of $4.3\% \pm 0.5$. The same microstructure is observed in other coatings of different thicknesses.

Additionally, evenly distributed pores with smaller sizes are generally preferred, as coatings with larger pores tend to have localized and more pronounced areas of wear-related damage (Sahraoui, N.-E. Fenineche, et al., 2003). The proportion of carbide and porosity revealed in the cross-section images are within the range usually observed for coatings of this type sprayed with HVOF. L_1 coatings fit snugly to the base, without cracks and failures, there are no signs of peeling. In L_1 , porosity increases closer to the surface. The carbide phase has an irregular shape and is not plastically deformed, while the metal bundle is plastically deformed. L_2 it is also seen that the carbide phase has an irregular shape and is not plastically deformed, while the metal bundle is plastically deformed. The carbide phase is well dissolved. However, there is a slight detachment from the substrate in the L_2 coating. L_3 carbide particles were plastically deformed due to the corresponding long stay in the hot jet. Microcracks and separation of the interface with the substrate indicate the concentration of stress in the coating (Ham et al., 2021). The coating thickness on the cross-section of the samples ranged from $25.6 \mu\text{m}$ to $120.91 \mu\text{m}$. As the spraying distance increased, the thickness of the metal-ceramic coating decreased.

The average surface roughness of the coatings L_1 , L_2 and L_3 is equal to $R_a = 0.672$ microns; $R_a = 0.743$ microns; $R_a = 0.808$ microns, respectively. The primary parameter used to assess

roughness was the R_a value, which represents the arithmetic mean deviation of the surface profile. It was found that the surface roughness varies depending on the spraying distance. To evaluate the roughness, the R_a value was used, which is the permissible arithmetic deviation of the surface. The values of the roughness of the coatings are shown in Figure 4.

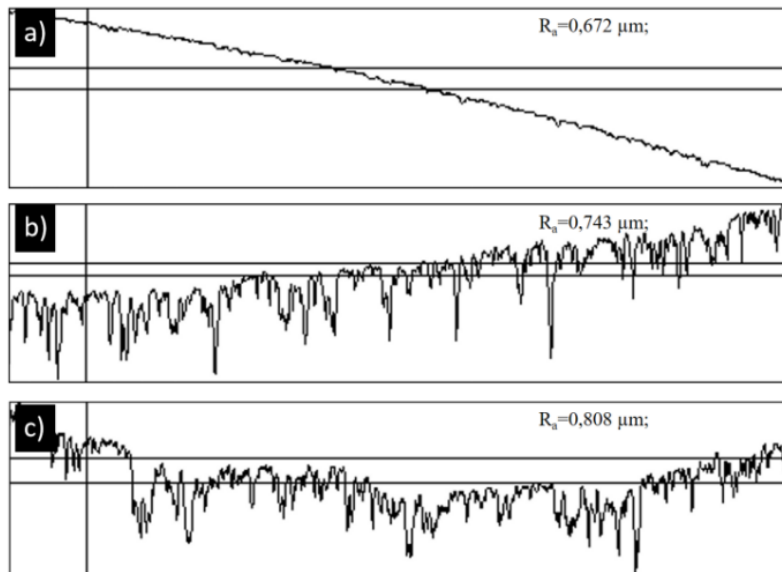


Figure 4. Surface roughness of the Cr_3C_2 -NiCr coating: a) 200 mm; b) 250 mm; c) 300 mm;

Note – compiled by the authors

The Cr_3C_2 phase in the molten and resolidified nickel matrix resulted in a reduction in surface roughness. This is an advantage as it reduces the time and cost of surface treatment (grinding and polishing) (G.-S. Ham et al., 2021). As the spray distance increased, the roughness of the coatings increased. In addition, as the spray distance increased, the temperature of the particles in flight within the flame decreased, resulting in a higher number of cold particles outside the flame. As a result, a developed coating surface is formed, characterized by high roughness.

The factors influencing the hardness of thermally sprayed coatings are the features of the microstructure, phase composition and porosity content. The results show that the Cr_3C_2 - 25NiCr coating sprayed at a distance of 200 mm HVOF demonstrates high microhardness (about 650 HV). Which is almost 2 times higher than the hardness of copper. High hardness is useful for wear resistance, as solid carbide can effectively compensate for external stress.

As the distance increased, the hardness of the coatings diminished ($L_1=654\pm 15\text{HV}_{0.1}$; $L_2=627.96\pm 15\text{HV}_{0.1}$; $L_3=373.3\pm 15\text{HV}_{0.1}$). The volume fraction of carbides in the phase composition of the coating at a spray distance of 200 mm (Figure 2) proves that the hardness of the coating depends on the degree of decarburization, that is, the higher the degree of decarburization, the lower the hardness. This is due to the influence of higher kinetic energy of particles on the release of carbides sprayed at shorter distances and an increase in the number of dislocations (Hamatani, Ichiyama and Kobayashi, 2002; J. G. La Barbera-Sosa et al., 2010). A higher particle velocity can be achieved at a relatively higher pressure and a shorter spray distance. With increasing velocity, particles have higher kinetic energy. When the particles collide with the substrate, this kinetic energy is converted into thermal energy. Thus, for particles with a higher velocity, the amount of deposited carbide may increase and the hardness

will increase. Another possible reason is related to the density of dislocations in the coating. At higher speeds, higher kinetic energy can lead to increased dislocation density and hardness.

As the spraying distance increases, the friction coefficient of the $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ coating also rises. Figure 6 illustrates the correlation between the friction coefficient and the sliding distance.

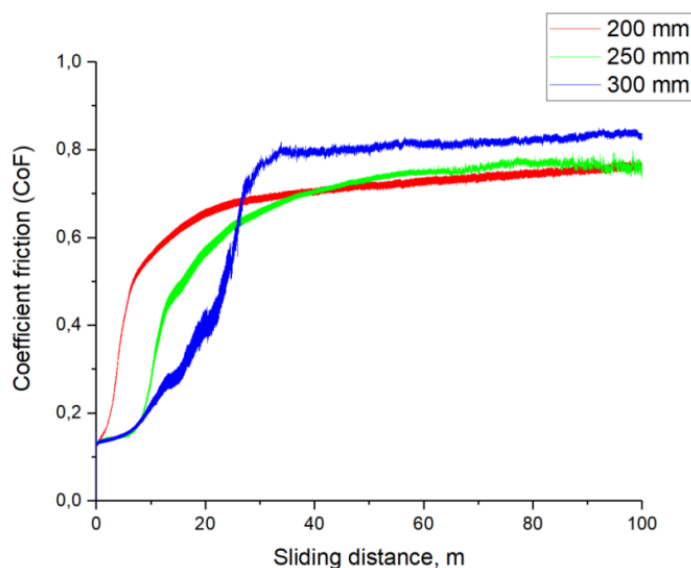


Figure 6. Graph of the dependence of the coefficient of friction on the sliding distance

Note – compiled by the authors

The friction coefficient of the coatings produced at different spraying distances is as follows: $L_1 - 0.7$; $L_2 - 0.75$; $L_3 - 0.8$. Samples L_1 , L_2 showed a more stable CoF after the lapping stage, however, a slight fluctuation in the sample L_2 can be noticed after reaching a sliding distance of about 90 m. The sprayed L_3 coatings showed a higher CoF than the rest of the coatings. It should be noted that coatings with a lower coefficient of friction can help reduce the wear rate (Govande et al., 2022).

Conclusions. X-ray analysis of the initial $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-25NiCr}$ powder and sprayed coatings by HVOF showed the presence of two main phases: binding CrNi_3 and solid Cr_3C_2 . The phases Cr_7C_3 and Cr_{23}C_6 were found in the coatings, which indicates the decarburization process of Cr_3C_2 . The analysis of the diffractogram revealed a detrimental effect of the Cr_3C_2 phase decomposition on the microhardness of the coating. A reduction in distance results in an increase in the intensity of the chromium carbide Cr_3C_2 peaks in the coatings. It was revealed that the NiCr binding phase was not detected in the L_3 coating, but Cr_{23}C_6 was formed instead due to decarbonization of the carbide phase. It was revealed that the main diffraction peaks of Cr_7C_3 and Cr_{23}C_6 may coincide with the lines related to NiCr and Cr_3C_2 , which makes it difficult to uniquely identify them by X-ray diffraction. It has been established that the decarburization of Cr_3C_2 is associated with heating of spray particles, which can lead to carbon loss and a change in the content of carbides in coatings.

The morphology of the cross-section of coatings obtained at different deposition distances is characterized by a predominance of dark gray contrast particles, which presumably correspond to the Cr_3C_2 phase, and a lighter gray matrix, probably representing a matrix with a high nickel content. It was observed that the coating thickness reduced as the spraying distance increased. The coating thicknesses for L_1 , L_2 , and L_3 were 120.91 μm , 47.63 μm , and 16.6 μm , respectively. L_1 exhibited strong adhesion to the substrate. It has been established that plastic

deformation of carbide particles is observed in coatings L₂ and L₃, which may indicate stress concentration in these samples.

It was observed that the average surface roughness of the coatings L₁, L₂ and L₃ is respectively R_a = 0.672 microns, R_a = 0.743 microns and R_a = 0.808 microns, which indicates the dependence of this parameter on the spraying distance. It was noted that as the spraying distance increased, the roughness of the coatings also increased. This can be attributed to a higher number of cold particles outside the hot flame center, leading to the formation of a more developed coating surface. It was determined that the Cr₃C₂-25NiCr HVOF coating sprayed at a distance of 200 mm demonstrates a high microhardness of about 650 HV, which is almost 2 times higher than the hardness of copper, which is important for increasing the wear resistance of coatings. It has been established that increasing the spraying distance increases the friction coefficient of the Cr₃C₂-NiCr ceramic coating, which is confirmed by the values of the coefficient of friction for coatings L₁ (0,7), L₂ (0,75) and L₃ (0,8).

Conflict of interest. The author(s) declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgments. This research has been funded by the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. BR24992864)

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

- Liu J., Zhu C., Li G. Application Research Progress of Coatings on Copper Plate in Continuous Casting Mould // *Cailiao Daobao/Materials Reports*. – 2019. – Vol. 33. – P. 2831-2838.
- Moro L., Srnc Novak J., Benasciutti D., De Bona, F. Copper mold for continuous casting of steel: Modelling strategies to assess thermal distortion and durability. In *Key Engineering Materials*. – 2017. – Vol. 754. – P. 287-290.
- Ryu M., Choi H., Yoon J., Choi Y. N., Lee S., Kim H. Lee H. Silica-nanoparticle reinforced lubricant-infused copper substrates with enhanced lubricant retention for maintenance-free heat exchangers. *Chemical Engineering Journal*, 2023. – Vol. 451. – P. 138657.
- Moro L, Srnc Novak J, Benasciutti D, De Bona F. Thermal distortion in copper moulds for continuous casting of steel: numerical study on creep and plasticity effect. *Ironmaking & Steelmaking*. – 2019. – Vol. 46(1). – P. 97-103.
- Velička M., Pyszko R., Přihoda M., Molínek J. Research of heat transport in mould for continuous casting of steel. *Metalurgija*. – 2009. – Vol. 48(4). – P 277-280.
- Swain A. N. S. S., Choudhary S. K., Ganguly S., Rajasekar K., Golani R., Singh V. Effect of initial solidification characteristics on longitudinal crack formation in thin slab caster. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2023. – Vol. 62(2). – P 372-382.
- Novak, J.S., Lanzutti, A., Benasciutti, D., De Bona, F., Moro, L., & De Luca, A. Metallurgical and surface damage analysis in a copper mold after service. In *Materials Today: Proceedings*. – 2018. – Vol. 5. – P 26709-26714.
- Berger L. M. Application of hardmetals as thermal spray coatings // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2015. – Vol. 1 (49). – P. 350-364.
- Bolelli, G., Berger, L. M., Börner, T., Koivuluoto, H., Matikainen, V., Lusvarghi, L., Vuoristo, P. Sliding and abrasive wear behaviour of HVOF- and HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings. *Wear*, -2016. Vol.32. – P. 358-359.
- Akhtari Zavareh, M., Sarhan, A. A. D. M., Razak, B. B., & Basirun, W. J. The tribological and electrochemical behavior of HVOF-sprayed Cr₃C₂-NiCr ceramic coating on carbon steel. *Ceramics International*, -2015, - Vol. 41(4). – P. 5387-5396.
- Guilemany, J.M., Nutting, J., Sobolev, V.V., Dong, Z., De Paco, J.M., Calero, J.A., & Fernandez, J. Interface structures of high velocity oxy-fuel sprayed WC-Co coating on a copper substrate. *Materials Science and Engineering*. – 1997. – Vol. 232(1-2). – P. 119-128.
- Yang K., Chen C., Xu G.Z., Zhang S.H. Application Status and Prospects of Thermal Spraying Technology in Metallurgical Field under Harsh Service Environment. *Surface Technology*. – 2022. – Vol. 51(1). – P. 16-32.
- Zhu C., Wang W., Lu C. Characterization of cermet coatings and its effect on the responding heat transfer performance in strip casting process // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2019. – Vol. 770. – P. 631-639.

- Govande, A. R., Chandak, A., Sunil, B. R., & Dumpala, R. Carbide-based thermal spray coatings: A review on performance characteristics and post-treatment. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. Elsevier Ltd. – 2022, February 1. – Vol.103. – P. 105772.
- Zhang, Y., Chong, K., Liu, Q., Bai, Y., Zhang, Z., Wu, D., & Zou, Y. (2021). High-temperature tribological behavior of thermally-treated supersonic plasma sprayed Cr₃C₂-NiCr coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. – 2021. – Vol. 95. – P. 105456.
- Alroy R. J., Kamaraj M., Sivakumar G. Influence of processing condition and post-spray heat treatment on the tribological performance of high velocity air-fuel sprayed Cr₃C₂-25NiCr coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 463. – P. 129498.
- Du J. Yu, Li F. Yi, Li Y. Le, Wang L. Ming, Lu H. Yang, Ran X. Ju, Zhang X. Yi. Influences of plasma arc remelting on microstructure and service performance of Cr₃C₂-NiCr/NiCrAl composite coating. *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol.369. – P.16-30.
- Ham, G. S., Kreethi, R., Kim, H. jun, Yoon, S. hoon, & Lee, K. A. Effects of different HVOF thermal sprayed cermet coatings on tensile and fatigue properties of AISI 1045 steel. *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol.15. – P. 6647-6658.
- Zimmermann S., Kreye H. Chromium Carbide Coatings Produced with Various HVOF Spray Systems. *Proceedings from the National Thermal Spray Conference. International Thermal Spray Conference*. – 1996. – P. 147-152.
- Mahade, S., Mulone, A., Björklund, S., Klement, U., & Joshi, S. Investigating load-dependent wear behavior and degradation mechanisms in Cr₃C₂-NiCr coatings deposited by HVOF and HVOF. *Journal of Materials Research and Technology*. – 2021. – Vol. 15. – P. 4595-4609.
- Matikainen V., Koivuluoto H., Vuoristo P. A study of Cr₃C₂-based HVOF- and HVOF-sprayed coatings: Abrasion, dry particle erosion and cavitation erosion resistance // *Wear*. – 2020. – Vol. 446-447. – P. 203188.
- Ozkan D. Structural characteristics and wear, oxidation, hot corrosion behaviors of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr hardmetal coatings // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 457. – P. 129319.
- Shi, C., Liu, S., Irfan, Gong, Q., Wang, H., & Hu, M. Deposition mechanisms and characteristics of nano-modified multimodal Cr₃C₂-NiCr coatings sprayed by HVOF. *Reviews on Advanced Materials Science*. – 2022. – Vol.61(1). – P. 526-538.
- Maheshwaran, S., Muthukumar, J., Gobalakrishnan, B., & Thirumani, K. S. (2022). Influence of Cr₃C₂ / NiCr Coating on Stainless Steel and Optimization of Mechanical Properties by Thermal Sprayed High Velocity Oxy-Fuel Coatings. – 2022. – Vol. 4(3). – P. 1-14.
- Tillmann, W., Kuhnt, S., Baumann, I.T. et al. Statistical Comparison of Processing Different Powder Feedstock in an HVOF Thermal Spray Process. *J Therm Spray Tech.* – 2022. Vol. 31. – P. 1476-1489.
- He J., Lavernia E. J. Precipitation phenomenon in nanostructured Cr₃C₂-NiCr coatings // *Materials Science and Engineering: A*. – 2001. – Vol. 1 (301). – P. 69-79.
- Muthu S. M., Arivarasu M., Krishna T. H., Ganguly S., Prabhakar K. V. P., Mohanty, S. Improvement in hot corrosion resistance of dissimilar alloy 825 and AISI 321 CO₂-laser weldment by HVOF coating in aggressive salt environment at 900°C. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2020. – Vol.27(11). – P. 1536-1550.
- Sahraoui T., Fenineche N. E., Montavon G., Coddet C. Structure and wear behaviour of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr and WC-Co coatings. *Materials and Design*. – 2003. – Vol. 24(5). – P. 309-313.
- Wang R., Ye S., Xie Z., Zhang Z., Han H., Hong J., Lu X. Effect of copper oxides on defect formation during PTA cladding of Stellite 6 on copper substrates. *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 466. – P. 129625.

Information about authors

Abizhanova Indira – Doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: www.indiko@mail.ru, ORCID: 0009-0006-3218-7246, +7 771 179 79 37.

Buitkenov Dastan – assoc.professor, PhD, S. Amanzholova East Kazakhstan university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: Buitkenovd@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0239-5849, +7 776 439 99 94

Magazov Nurtoleu – Doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: magazovn@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9941-9199, +7 747 426 30 19

Kusainov Arystanbek – Doctoral student, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: arys20055@gmail.com, Scopus Id: 59065558000, +7 707 783 70 60

Abdulina Saule – professor, PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: abdulina.saule@mail.ru, +7 705 416 80 60

МЕТАЛЛУРГИЯ
МЕТАЛЛУРГИЯ
METALLURGY

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_15
IRSTI 53.37.15

M.A. Adilkanova¹, G.A. Kokayeva², P.A. Agzamova¹, M.A. Kaparov¹

¹D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

E-mail: milka160281@mail.ru*

E-mail: PAgzamova@ektu.kz

E-mail: kaparov_madi_askhatovich@mail.ru

²S. Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan

E-mail: gakoakaeva@mail.ru

IMPROVING THE TECHNOLOGY FOR PROCESSING OXIDIZED COPPER ORES FROM DEPOSITS IN KAZAKHSTAN

ҚАЗАҚСТАН КЕН ОРНЫНЫҢ ТОТЫҚҚАН МЫС КЕНДЕРІН ӨҢДЕУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ЖЕТІЛДІРУ

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ОКИСЛЕННЫХ МЕДНЫХ РУД МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЗАХСТАНА

Abstract. The article presents research on improving the technology of processing oxidized copper ore, using the example of the Zharyktas deposit, in order to increase copper extraction due to sulfidization of oxidized copper minerals. The mineralogical, chemical and phase composition of the ore has been studied. When processing this ore using an improved technology, a concentrate with a copper content of 21.20% was obtained, which increased copper extraction by 42.77% compared to the basic technology.

Keywords: oxidized copper ores; flotation; reagents; concentrate; extraction.

Аңдатпа. Мақалада тотыққан мыс минералдарын сульфидтеу арқылы мыс алуды арттыру мақсатында Жарықтас кен орнының мысалында тотыққан мыс кенін өңдеу технологиясын жетілдіру бойынша зерттеулер келтірілген. Кеннің минералогиялық, химиялық және фазалық құрамы зерттелді. Бұл кенді жетілдірілген технология бойынша өңдеу кезінде құрамында мыс мөлшері 21,20% болатын концентрат алынды, бұл мыс өндіруді базалық технологиямен салыстырғанда 42,77 %-ға ұлғайды.

Түйін сөздер: тотыққан мыс кендері; флотация; реагенттер; концентрат; экстракция.

Аннотация. В статье приведены исследования по усовершенствованию технологии переработки окисленной медной руды, на примере месторождения Жарыктас, с целью повышения извлечения меди за счет сульфидизации окисленных медных минералов. Изучены минералогический, химический и фазовый состав руды. При переработке данной руды по усовершенствованной технологии был получен концентрат с содержанием меди 21,20 %, что увеличило извлечение меди на 42,77% по сравнению с базовой технологией.

Ключевые слова: окисленные медные руды; флотация; реагенты; концентрат; извлечение.

Introduction. In the Republic of Kazakhstan, there is currently an acute problem of providing copper industry enterprises with high-quality mineral raw materials due to the depletion of the mineral resource base. According to the Ministry of Industry and New Technologies of the RK, reserved reserves of copper and polymetals in Kazakhstan remain for 10-15 years (Goncharov 2022).

In recent years, oxidized and mixed copper ores from such deposits as Aktogay, Kounrad, Benkala, Nurkazgan, Shatytkul, Karchiga, Taskora, Borly, Ayak-Kodzhan, Bozshakol, Baitemir, Beschoku, Zhezkazgan, Vavilonskoe have been investigated to replenish the mineral resource base of copper in the Republic of Kazakhstan.

Features of the material composition of oxidized and mixed ores of non-ferrous metals predetermine their technological properties. One of the main features of the material composition is the complexity of their mineral composition. The mineralogy of oxidized and mixed ores is much more extensive than the mineralogy of sulfide ores, they have a finer structure and are very difficult for enrichment (Kenzhalyev 2024 - Bakov 2000).

The solution to the problem of processing oxidized copper ores by the flotation method is seen in changing the properties of oxidized minerals in the direction of surface hydrophobization. Joint flotation of sulfide and oxidized copper minerals in the presence of a sulfidizing agent in the case of depression of iron sulfides with lime is carried out only at a low degree of oxidation and a variable content of oxidized copper in the ore, as, for example, at the Almalyk, Balkhash processing plants and at the “Marcopper” factory. Researchers are actively engaged in the development of new methods and enrichment schemes, the synthesis of highly efficient flotation reagents. One of the methods for solving the problem is the chemical modification of minerals through sulfidization, as a result of which oxidized minerals are converted into sulfide minerals with a hydrophobic surface. Various sulfidizing reagents can be used to make such a transformation. Among them is sodium sulfide. The effectiveness of the action of sodium sulfide is also determined by the release of elemental sulfur on the surface of the sulfided mineral as a result of the oxidation of the sulfidizing agent. At the same time, elemental sulfur plays the role of an additional surface water repellent. The effect of preliminary sulfidization with this reagent on the flotation of oxidized copper ore was studied. The experiments were carried out under optimal flotation conditions: the degree of ore sulfiding is 40%; consumption of xanthate is 400 g/t, blowing agent is 100 g/t of ore. Also, for comparison, experiments were carried out on flotation without sulfidization of the ore. It was found that the preliminary sulfiding of the ore with a reagent based on mechanically activated sulfur has a positive effect on the results of flotation - the quality of the concentrate increases by 0.74%, the extraction of copper into the concentrate increases by 30% (Abramov 2005- Omarova 2015).

In VNIITsvetmet, studies were carried out on the flotation enrichment of mixed copper ores on a sample of one of the sections of the Zhezkazgan deposit. According to the data of phase chemical analysis, copper in this sample is represented by 45.8% rel. oxidized forms and 54.2% rel. – sulfide forms (including in the form of secondary sulfides 45.8% rel., primary – 8.4% rel.). After a series of tests on the selection of flotation reagents, potassium amyl xanthate was used as a collector, and methylisobutylcarbinol was used as a blowing agent. Sodium sulfide was used as a sulfidizing agent in experiments to develop the conditions of the main flotation. According to the developed scheme of ore enrichment in laboratory conditions, a copper concentrate was obtained with a copper content of 31.32% with an extraction of 74.47% (Sherembaeva 2014- Gusev 2018).

Thus, the relevance of the research topic lies in the fact that the most difficult objects for processing are mixed and oxidized copper ores, which make it difficult to obtain high technological performance to produce high-quality homonymous concentrates or a high extraction of the main valuable components.

In this regard, in order to improve the technology of processing oxidized copper ore, the ore of the Zharyktas deposit was studied in order to increase copper extraction due to sulfidization of oxidized copper minerals (Gusev 2018-Chernousenko 2019).

Materials and methods of research. Samples of oxidized copper ore from the Zharyktas deposit were examined for mineral and petrographic studies. The slots and anschlyphs were studied using an Olympus BX-51 optical microscope, as well as an Olympus SZX16 stereo microscope. X-ray diffraction analysis was performed on a BRUKER D8 ADVANCE X-ray diffractometer. The DIFFRAC.EVA universal program was used to process X-ray diffraction data.

Results and discussion. According to mineralogical analysis, the sample of copper ore is represented by core material, rocks are dark gray, gray, brownish gray and brown in color with a massive texture. The rocks are fragmented and riddled with numerous veins. Oxidized copper minerals are visible in the lumpy material. They are mainly represented by malachite, chrysocolla is marked in the form of single nests. Ore minerals are developed along the cracks of the rock, forming thin filamentous veins. Rare inclusions in the breed were also noted. Malachite forms leaky, less often concentric and ray-shaped formations along the cracks. The most characteristic samples are shown in Figure 1.



Figure 1. General view of the rocks of the copper ore sample of the Zharyktas deposit

Note – compiled by the authors

The selected samples were used to make slots and full plates, which were studied using an Olympus BX-51 optical microscope, as well as an Olympus SZX-16 stereomicroscope. The average sample was also studied using X-ray diffraction analysis performed on a BRUKER D8 ADVANCE X-ray diffractometer. The DIFFRAC.EVA universal program was used to process X-ray diffraction data. The results of diffractometric (X-ray diffraction) analysis are shown in Figure 2.

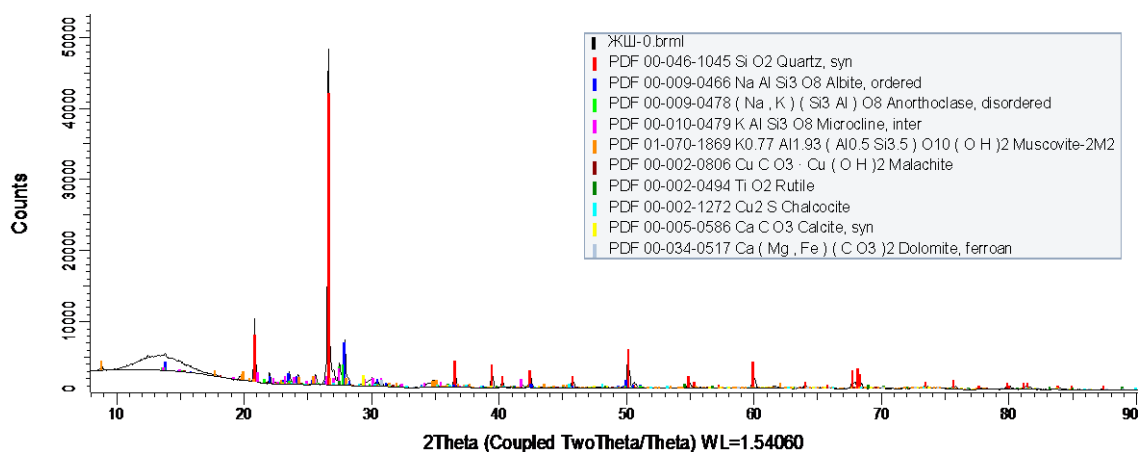


Figure 2. Results of diffractometric (X-ray diffraction) analysis of a sample of copper ore from the Zharyktas deposit

Note – compiled by the authors

Based on the results of X-ray diffraction analysis, as well as data from mineralogical and petrographic studies, it was found that quartz, feldspar, mica minerals predominate in the sample. Feldspars are represented by albite, microcline and orthoclase. Micaceous minerals are mainly represented by muscovite. Calcite and dolomite are noted among the carbonate rocks. Ore minerals in the sample of the studied ore from the Zharyktas deposit are represented by oxidized copper minerals (malachite, chrysocolla, tenorite), as well as secondary sulfide minerals (chalcocite, covellite, bornite). Rutile grains were also noted in the sample. Iron hydroxides and sulfide minerals (pyrite, chalcopyrite) were found in the form of single grains. The percentage of minerals in the sample is shown in Table 1.

Table 1. Mineral composition of copper ore samples from the Zharyktas deposit

The mineral	Content, %
Quartz	50,75
Feldspars	24,60
Micaceous minerals	18,20
Carbonate minerals	3,85
Oxidized copper minerals	0,3
(malachite, chrysocolla, tenorite)	0,2
Secondary copper minerals	0,1
Rutile	Single grains
Sulfide minerals	Single grains
Iron hydroxides	2,00
<i>Note – compiled by the authors</i>	

Rocks in petrographic terms are represented by lavas and lavobreccias, as well as tuffs of rhyolite-rhyodacite composition. In general, almost the same initial rock is visible in all rocks, represented by porphyry of acid composition (rhyolite or rhyodacite).

The oxidized copper minerals in the sample are dominated by malachite. It is developed both along the cracks of the rock, forming a veined mineralization, and in the rock itself with the formation of a rare, uneven interspersed mineralization (Figure 3).

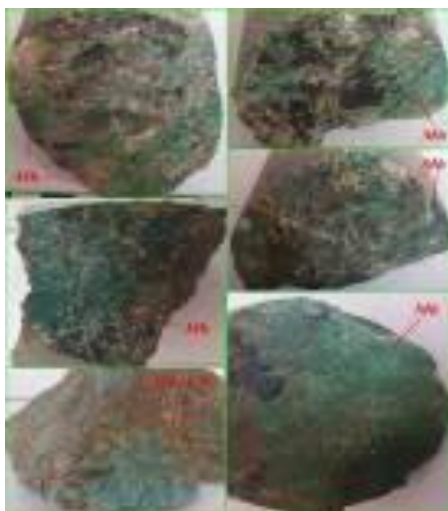


Figure 3. Inclusions and sintering forms of malachite made by cracks in rocks

Note – compiled by the authors

In the interspersed mineralization, malachite is developed in the form of xenomorphic clusters, rare tabular and ray-shaped grains, clusters of grains are also noted. The grain size ranges from 100-150 microns to 0.3-0.5 cm, less often larger clusters up to 1.5-2 cm are noted. Concentric clusters of malachite are marked as single grains. In addition to malachite, tenorite is also noted in association with chalcocite. Upon detailed examination, literally single nests of malachite in association with chrysocolla were noted in the sample. Chrysocolla has not been found in the form of independent grains.

In addition to oxidized copper minerals, secondary copper minerals are also shown in the sample. They are mainly represented by chalcocite, to a lesser extent covellin and chalcocite are manifested. The most intense interspersed mineralization tends to tuffs. Only single grains of covellin and chalcocite developed in the form of inclusions in tonsils, clusters of quartz, less often quartz-carbonate composition were noted in the catches (Figure 5). The size of such tonsils is 12-115 microns. The size of chalcocite and covellin grains in tonsils ranges from 1-3 microns to 12-17.5 microns. Single independent chalcocite grains with a size of 5-21 microns were also noted, sometimes developed in association with bornite and chalcopyrite (Figure 4).

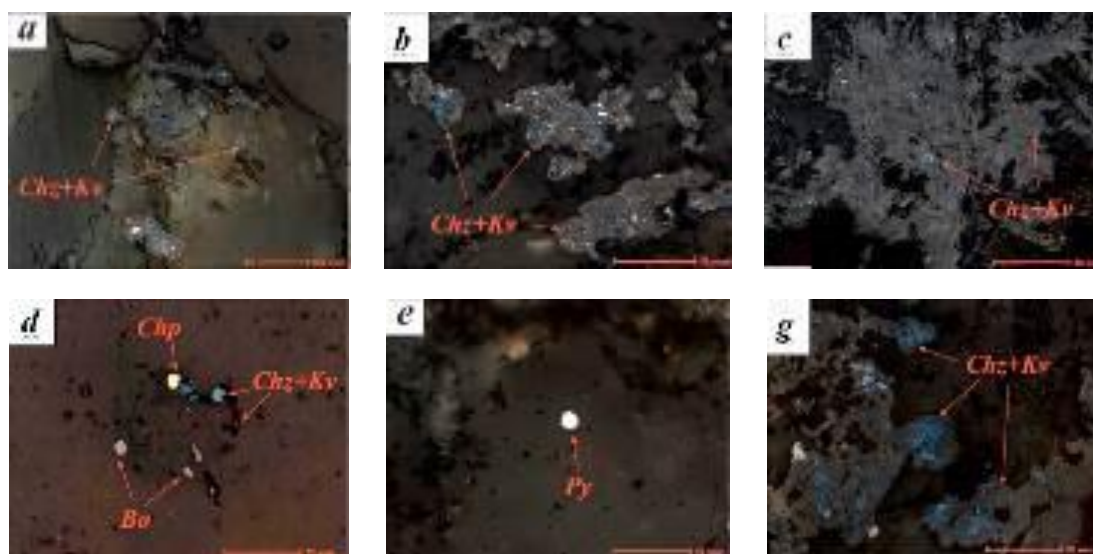


Figure 4. Polished section: a-g – amygdules composed of grains of chalcocite and covellin;
d-e – single grains of chalcopyrite, pyrite and bornite

Note – compiled by the authors

In tuffs, however, a more intense interspersed mineralization is manifested. It is represented by isometric, xenomorphic, slightly angular chalcocite grains (Figure 5, a). Their size ranges from 25-50 microns to 360-580 microns. Chalcocite is developed in association with bornite, covellin and chalcopyrite. Covellin is presented in the form of needle-like, paniculate formations of chalcocite. Bornite is manifested mainly in the central part of chalcocite in the form of xenomorphic formations (Figure 5, b, c). Small grains of covellin are developed in association with bornite.

Needle-like, lamellar structures of chalcopyrite decay are also noted in bornite (Figure 5, c, d). In addition, chalcopyrite is manifested as independent large grains in association with chalcocite. In such associations, chalcocite forms a kind of chalcopyrite rim (Figure 5, e). Both a monomineral margin (chalcocite proper) and a close association of chalcocite with covellin, less often with tenorite, were noted (Figure 5, e).

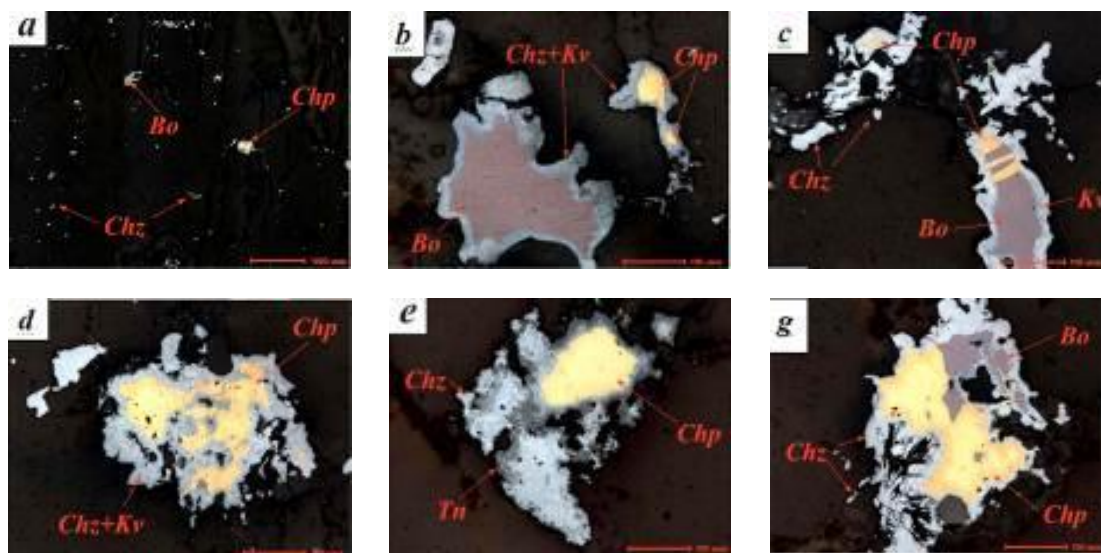


Figure 5. Polished section. Disseminated mineralization in tufas: a – dissemination of chalcoite grains in association with bornite and chalcopyrite; b – chalcoite grains, their central part is made of chalcopyrite and bornite; c, g – chalcoite grain in association with bornite, in bornite, decay structures composed of chalcopyrite; d – chalcopyrite grain with a chalcoite border, acicular covellite grains developed along chalcoite; e – chalcopyrite in association with chalcoite and tenorite

Note – compiled by the authors

The results of chemical and phase chemical analysis of the initial sample of copper ore from the Zharyktas deposit are shown in Tables 2 and 3.

Table 2. Chemical composition of a sample of copper ore from the Zharyktas deposit

Component	Content, %	Component	Content, %
Cu	0,50	K	3,32
Fe	1,16	Ba	<0,2
Au, г/т	0,040	Mn	0,016
Ag, г/ т	2,0	Ca	1,14
Zn	<0,01	Al	6,01
Pb	<0,01	Mg	0,29
Na	1,22	Te	<0,0020
SiO ₂	70,66	Bi	0,0028
S _{общ.}	<0,1	Re	<0,00045
As	<0,030	S _{SO4}	<0,1
Cd	<0,002	Sb	<0,0050
Ge	0,0003	Cr	0,0010

Note – compiled by the authors

Based on the results of studying the material composition of the studied sample of oxidized copper ore, it was established:

- the copper content in the ore is 0.50-0.53%, of which 64.4% rel. represented by oxygen-containing compounds, 30.0% rel. secondary sulfides and 5.6% rel. primary sulfides;
- the content of iron in the ore is 1.16%, calcium – 1.14%, magnesium – 0.29%, aluminum – 6.01%, sodium – 1.22%, potassium – 3.32%, silicon dioxide – 70, 66%, total sulfur – less than 0.1%, gold – 0.04 g/t, silver – 2.0 g/t;

– petrographically, the ore sample is composed of lavas, lava breccias and tufas of rhyolite (rhyolite dacitic) composition;

– the following minerals predominate in the sample: quartz, feldspars and micaceous minerals;

– copper minerals in the sample are represented by oxidized (malachite, chrysocolla, tenorite), secondary sulfide minerals (chalcocite, covellite, bornite) and single grains of chalcopyrite;

– malachite predominates among the oxidized minerals. It is developed in the form of xenomorphic, ray-shaped and concentric accumulations, as well as in the form of veinlet mineralization. Vein mineralization is confined to rock cracks;

– secondary minerals are represented by chalcocite, bornite, and covellite. It should be noted that in lavas (lavobreccias) chalcocite and covellite are developed in the form of rare amygdala-shaped accumulations. The amygdules are composed of quartz, less often quartz-carbonate aggregate. Intense dissemination of chalcocite and covellite grains is developed in them. The tufas contain more intense dissemination composed of chalcocite proper. Bornite, covellite and chalcopyrite are developed in association with chalcocite;

– a detailed study noted a small grain of native gold.

Basic technology the enrichment of oxidized copper ore is carried out according to the scheme shown in Figure 6.

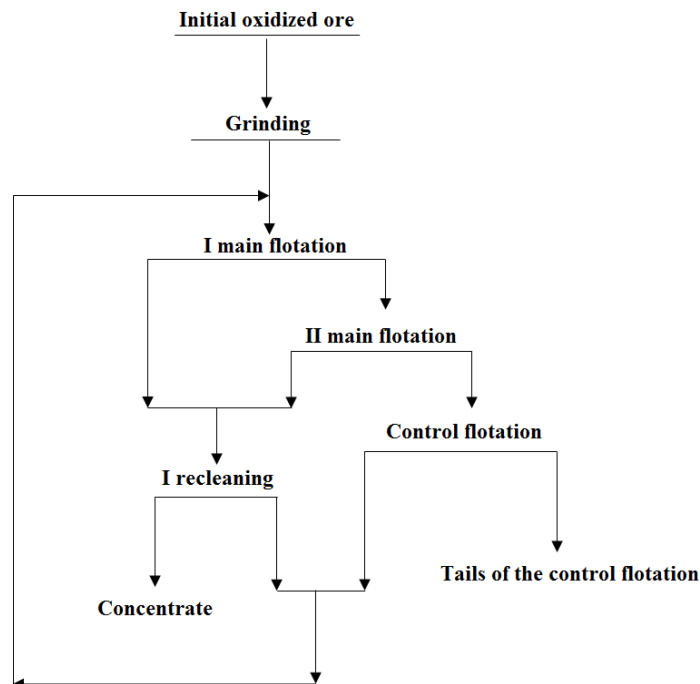


Figure 6. Basic scheme of enrichment of oxidized copper ore

Note – compiled by the authors

When processing ore according to this scheme, a concentrate with a copper content of 22.1% was obtained while extracting copper of 22.96%. The copper content in the tailings was 0.38%.

The proposed improved technology enrichments of oxidized copper ore of the investigated ore of the Zharyktas deposit with preliminary sulfidization was carried out according to the scheme including:

- ore grinding to a fineness of ~80% class minus 0.071 mm;
- basic sulphide flotation;
- main and control oxidized flotation;
- two recleanings of the crude concentrate of the main sulfide and main oxidized flotation;
- middling flotation of the concentrate of the control oxidized flotation and tailings of the first cleaning. The middling flotation concentrate was sent to the first cleaning.

Technological tests to determine the optimal size of ore crushing were carried out on a laboratory ball mill of the roller type with a size of 150x215 mm at W:T:W = 1:0.6:9 (T:W:W is the ratio of solid to liquid and to ball loading). The weight of the initial sample is 1 kg by dry weight, the pulp density is ~ 60% solid, the working volume of the mill is 3.0 liters. The results of the ore crushing tests are shown in Table 3 and Figure 7.

Table 3. Change in the granulometric composition of a sample of copper ore from the Zharyktas deposit during grinding in a laboratory ball mill

Size class, mm	Output of the class, % at the grinding time						
	0 min	10 min	20 min	30 min	40 min	50 min	60 min
minus 0,071	9,02	25,9	37,2	54,0	74,0	88,1	94,1
minus 0,045	7,17	18,8	27,1	39,1	53,0	65,9	75,2

Note – compiled by the authors

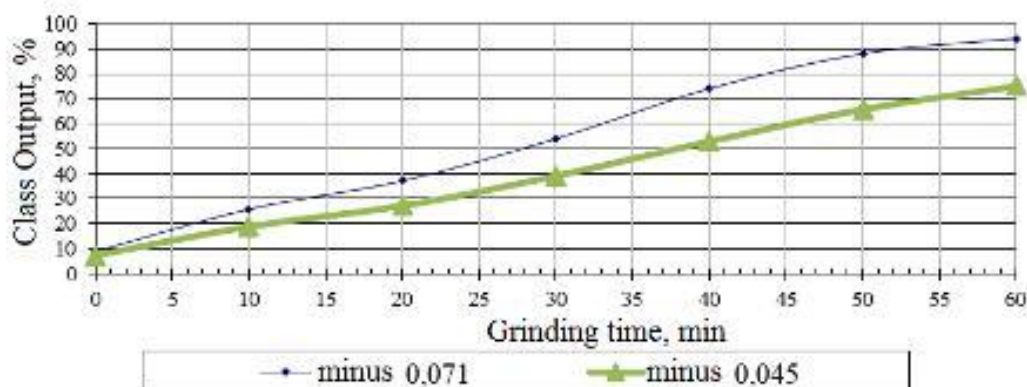


Figure 7. Dependence of the degree of grinding of a sample of copper ore from the Zharyktas deposit on the duration

Note – compiled by the authors

When grinding ore from 37.2 to 94.1% of the -0.071 mm class, the extraction of copper into the concentrate of the main flotation changes from 20.7 to 25.9%. At the same time, the copper content in the rough concentrate varies between 3.16-7.34%. The experimental results showed that the optimal size for ore flotation can be considered to be ~ 80% of the class minus 0.071 mm.

Research on flotation enrichment was carried out on laboratory flotation machines of the "Mechanobr" type with a chamber volume of 3.0 dm³.

The processing of oxidized copper ore from the Zharyktas deposit was carried out according to the scheme shown in Figure 8 and the results obtained are shown in Table 4. The reagent consumption was: sulfidizer (Na₂S) – 620 g/t; collector – (SBX) – 120 g/t; foamer (MIBC) – 65 g/t.

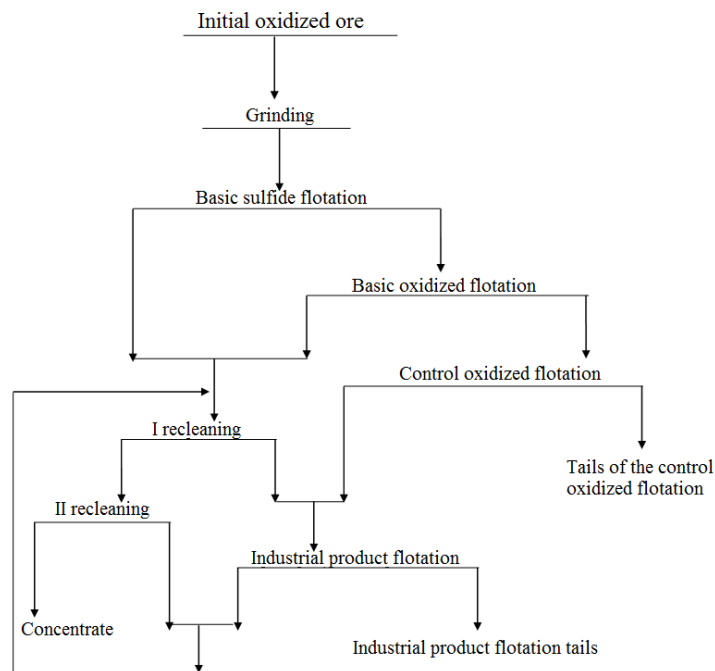


Figure 8. An improved scheme for the enrichment of copper oxidized ore from the Zharyktas deposit
Note – compiled by the authors

Table 4. Distribution of copper by products of the circuit experience

Product name	Exit, %	copper content, %	extraction of copper, %
Concentrate	1,52	21,20	65,73
Industrial product flotation tails	6,88	0,71	9,98
Tails of the control oxidized flotation	91,60	0,13	24,29
Σ tails	98,48	0,171	34,27
ore	100,00	0,490	100,00

Note - compiled by the authors

When processing ore according to this scheme, a concentrate was obtained with a copper content of 21.20% and final tailings with a content of 0.171%, with the extraction of copper 65.73% and 34.27% of the ore, respectively.

Conclusions. Thus, the technology of processing oxidized copper ore from the Zharyktas deposit has been improved in order to increase copper extraction due to sulfidization of oxidized copper minerals. When processing this ore using an improved technology, a concentrate with a copper content of 21.20% was obtained, which increased copper extraction by 42.77% compared to the basic technology. The improvement of the technology for processing oxidized copper ore from the Zharyktas deposit and its successful implementation into production in the future will increase the efficiency of ore processing and obtain a technical and economic effect.

Conflict of interest. The author(s) declare that there is no conflict of interest.

Notice of Use of Generative AI and AI-assisted technologies during the writing of the manuscript. In preparing this work, the authors did not use generative artificial intelligence.

References

- Goncharov I. V., Salikhov, V. R. 2020. Processing of copper ores in Kazakhstan: current achievements and prospects. *Kazakhstan Mining Industry*, 12(4), 45-60.
- Kenzhaliev B.K., Koizhanova A.K., Chepushtanova T.A., Mukangaliyeva A.O., Magomedov D.R. Innovative methods for processing copper ores in Kazakhstan: a comprehensive approach to enhancing the efficiency of valuable component extraction, 2024.
- Reznichenko A.V., Kushakova L.B. Vliyanie sul'fidizatsii na pokazateli obogashcheniya smeshannoj rudy odnogo iz uchastkov ZHezkazganskogo mestorozhdeniya. – Ust'-kamenogorsk: Sbornik nauchnyh trudov, 2015. - 32 s.
- Oskembekov I.M., Bekturganov N.S. Ispol'zovanie processa sul'fidirovaniya pri pererabotke okislennyh mednyh rud // Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya. – 2017. – № 1. – S.16–22.
- Bekturganov N.S., Katkeeva G.L. Primenenie sul'fidizatsii pri pererabotke okislennyh mednyh rud Udokanskogo mestorozhdeniya // Cvetnye metally. – 2016. – №9. – S. 151-167
- Bakov A.A., Arzhannikov G.I. Patent na izobretenie Rossijskoj federacii. Sposob pererabotki okislennyh mednyh rud. opubl. 27.05.2000.
- Abramov A.A. Tekhnologiya pererabotki i obogashcheniya rud cvetnyh metallov. – M.: Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2005. – 575 s.
- Gorlova O.E., Shadrinova I.V., Sinyanskaya O.M. Razrabotka kombinirovannoj flotacionno-gidrometallurgicheskoy nekslotnoj tekhnologii pererabotki otvalov zabalansovyh mednyh rud // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten. – 2018. – №12. – S. 151–167.
- Zimbovsky I.G.; Ivanova T.A.; Chanturia V.A.; Chanturia E.L. Complex-forming collector for selective flotation of chalcopyrite. *Phys. Tech. Probl. Miner. Dev.* 2015, 3, 124–129.
- Bu Y.; Hu, Y.; Sun W.; Gao Z.; Liu R. Fundamental Flotation Behaviors of Chalcopyrite and Galena Using O-Isopropyl-N-Ethyl Thionocarbamate as a Collector. *Minerals* 2018, 8, 115.
- Ryabov V.I.; Shepeta E.D. Effect of surface activity and water-repellent dialkyldithiophosphates properties on the flotation of copper arsenic-containing ores. *Obogashchenie Rud.* 2016,4,29-34.
- Omarova N.K.; Sherembaeva R.T. Flotation of sulfide copper ore with PS flotation reagent. *Ore Benef.* 2015, 2, 15–17.
- Sherembaeva R.T.; Omarova N.K.; Akimbekova B.B.; Katkeeva G.L. The use of a new R flotation agent in the sulfide copper ores flotation. *Non-Ferr. Metals* 2014, 6, 12–16.
- Mitrofanova G.V.; Chernousenko E.V.; Bazarova E.A.; Tyukin A.P. Search for new complexing reagents for copper-nickel ores flotation. *Non-Ferr. Metals* 2019, 11, 27–33.
- Xiao J.; Liu G.; Zhong, H.; Huang, Y.; Cao, Z. The flotation behavior and adsorption mechanism of O-isopropyl-S-[2-(hydroxyimino)propyl] dithiocarbonate ester to chalcopyrite. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2017, 71, 38–46.
- Gusev V.Y.; Radushev A.V.; Chekanova L.G.; Baigacheva E.V.; Manylova K.O.; Gogolishvili V.O. Azo derivatives of phenol and 1-naphthol as collectors for flotation of non-ferrous metal sulfide ores. *J. Appl. Chem.* 2018, 4, 503–512.
- Chernousenko E.V.; Mitrofanova G.V.; Kameneva Y.S.; Vishnyakova I.N. Evaluation of the action of complexing reagents in the copper-nickel ores flotation. *Tsvetnye Met.* 2019, 1, 7–12.
- Adiguzel E.; Yilmaz F.; Emirik M. Synthesis and characterization of two new hydroxamic acids derivatives and their metal complexes. An investigation on the keto/enol, E/Z and hydroxamate/hydroximate forms. *J. Mol. Struct.* 2017, 1127, 403–412.
- Morozov V.V.; Pesriak I.V.; Erdenezul J. Influence of concentration of amyloxanthogenic acid allyl ester, non-ionic collector, on copper-molybdenum ores flotation. *Tsvetnye Met.* 2018,11,14–20.
- Jargalsaikhan E.; Ishgen K. Process optimization of grinding and flotation of copper-molybdenum ores with the use of model-based criteria. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Environment and Mineral Processing, Ostrava, Czech Republic, 31 May–2 June 2018*; pp. 152–154.

Information about authors

Adilkanova M.A. – PhD, associate professor, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan E-mail: milka160281@mail.ru

Kokayeva G.A. – Candidate of Technical sciences, Ass. Professor of the Department of Technological machines and equipment, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Kazakhstan. E-mail: gakokaeva@mail.ru

Ағзамова П.А. – teacher D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan. E-mail: PAgzamova@ektu.kz

Kaparov Madi Askhatovich – student of the group 22-OPK-1, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan E-mail: kaparov_madi_askhatovich@mail.ru

МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_25
MPHTI 55.57.01

Ж.А. Бекмырза

НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы»,
г. Костанай, Казахстан
E-mail: 5112431@mail.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕНТОЧНОГО ТРАНСПОРТЕРА ДЛЯ РАБОТЫ С СИЛЬНО ЗАСОРЕННЫМИ ЗЕРНОВЫМИ КУЛЬТУРАМИ

ҚАТТЫ ЛАСТАНҒАН АСТЫҚ ДАҚЫЛДАРЫН ӨНДЕУГЕ АРНАЛҒАН ТАСПАЛЫ КОНВЕЙЕРДІҢ ДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАРЫН ЗЕРТТЕУ

THE STUDY OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A BELT CONVEYOR FOR WORKING WITH HEAVY CONTAMINATED GRAIN CROPS

Аннотация. Актуальность тематики, заявленной в рамках данного научного исследования, заключается в существенной значимости ленточных транспортеров в технологических процессах обработки сельскохозяйственных культур и необходимости изучения их динамических характеристик, как важнейшего фактора безаварийного функционирования. Основной целью исследования является изучение принципов конструкции и движения ленточных транспортёров, которые используются в практике сельскохозяйственных предприятий для работ по сбору и транспортировке зерна. Основу методологического подхода в данной научной работе составляет теоретическое исследование общих принципов совершенствования конструктивно-режимных параметров ленточного транспортёра для работы с засоренными зерновыми культурами. Полученные результаты свидетельствуют о наличии прямой зависимости между параметрами производительности ленточного транспортёра, с одной стороны, и шириной транспортёрной ленты, скоростью её движения, а также плотностью перемещаемой зерновой массы, с другой стороны. Все полученные зависимости были представлены в виде математических выражений. Также были установлены основные типы ленточных транспортёров, которые применяются для работы с зерновыми культурами, представлена классификация подобного рода технических устройств. Рассмотрен перечень стандартизованных нормативных документов, регламентирующих технические условия применения ленточных транспортёров. Также были определены основные конструктивные и режимные характеристики ленточных транспортёров, которые используются для работы с сильно засоренными зерновыми культурами. Определены перспективы их усовершенствования в целях оптимизации технологических операций по сбору и транспортировке зерновых культур на предприятиях сельскохозяйственного сектора Республики Казахстан.

Ключевые слова: сельское хозяйство, аграрный сектор, конвейер, промышленное оборудование, технологические устройства, технические условия.

Аңдатпа. Осы ғылыми зерттеу аясында жарияланған тақырыптың өзектілігі ауылшаруашылық дақылдарын өңдеудің технологиялық процестеріндегі таспалы тасымалдаушылардың маңыздылығында және апатсыз жұмыс істеудің маңызды факторы ретінде олардың динамикалық сипаттамаларын зерттеу қажеттілігінде жатыр. Бұл ғылыми зерттеудің негізгі мақсаты ауылшаруашылық кәсіпорындарының тәжірибесінде астық жинау және тасымалдау жұмыстары үшін қолданылатын таспалы тасымалдаушылардың дизайны мен қозғалысының принциптерін зерттеу болып табылады. Бұл ғылыми жұмыстағы әдіснамалық тәсілдің негізі бітелген дәнді дақылдармен жұмыс істеу үшін таспалы тасымалдаушының құрылымдық-режимдік параметрлерін жетілдірудің жалпы принциптерін теориялық зерттеу болып табылады. Бұл ғылыми-зерттеу жұмысында бір жағынан таспалы тасымалдаудың өнімділік параметрлері мен тасымалдау таспаның ені, оның қозғалыс жылдамдығы, сондай-ақ екінші жағынан қозғалатын астық массасының тығыздығы арасында тікелей тәуелділіктің бар екендігін көрсететін нәтижелер

алынды. Алынған барлық тәуелділіктер математикалық өрнектер түрінде ұсынылды. Сондай-ақ, дәнді дақылдармен жұмыс істеу үшін қолданылатын таспалы транспортерлердің негізгі түрлері белгіленді, осындай техникалық құрылыстардың жіктелуі ұсынылды. Таспалы тасымалдаушыларды қолданудың техникалық шарттарын регламенттейтін стандартталған нормативтік құжаттардың тізбесі қаралды. Сондай-ақ, қатты бітелген дәнді дақылдармен жұмыс істеу үшін қолданылатын таспалы тасымалдаушылардың негізгі құрылымдық және режимдік сипаттамалары анықталды. Қазақстан Республикасының Ауыл шаруашылығы секторының кәсіпорындарында дәнді дақылдарды жинау және тасымалдау жөніндегі технологиялық операцияларды оңтайландыру мақсатында оларды жетілдіру перспективалары айқындалды.

Түйін сөздер: ауыл шаруашылығы, аграрлық сала, конвейер, өнеркәсіптік жабдықтар, технологиялық құрылыстар, техникалық шарттар.

Abstract. The relevance of the topic stated within the framework of this scientific research lies in the significant importance of belt conveyors in technological processes for processing agricultural crops and the need to study their dynamic characteristics as the most important factor in trouble-free operation. The main goal of this scientific research is to study the principles of design and movement of belt conveyors, which are used in the practice of agricultural enterprises for collecting and transporting grain. The basis of the methodological approach in this scientific work is a theoretical study of the general principles of improving the design and operating parameters of a belt conveyor for working with weeded grain crops. In this research work, results were obtained indicating the presence of a direct relationship between the performance parameters of the conveyor belt on the one hand, and the width of the conveyor belt, its speed, as well as the density of the transported grain mass on the other hand. All obtained dependencies were presented in the form of mathematical expressions. The main types of belt conveyors that are used to work with grain crops were also established, and a classification of this type of technical devices was presented. The list of standardized normative documents regulating the technical conditions for the use of belt conveyors is considered. The main design and operational characteristics of belt conveyors, which are used to work with heavily clogged grain crops, were also determined. The prospects for their improvement have been identified in order to optimize technological operations for the collection and transportation of grain crops at enterprises in the agricultural sector of the Republic of Kazakhstan.

Keywords: agriculture, agricultural sector, conveyor, industrial equipment, technological devices, technical conditions.

Введение. Проблематика данного научного исследования заключается в существенном влиянии динамических характеристик ленточного транспортёра, который используется для работы с сильно засоренными зерновыми культурами, на его эффективность. Ленточный транспортёр выполняет функции транспортировки зерна, а также продуктов его переработки под углом до 5°. Подобные устройства могут быть выполнены как в открытом, так и в закрытом варианте, их эксплуатация осуществляется в помещениях и на открытых пространствах. Применение ленточных транспортёров для перемещения зерна предполагает возможность его доставки на расстояние до 10-12 километров и более, при этом подобные агрегаты представляют собой набор отдельных секций. Динамические характеристики ленточных транспортёров определяют их производительность, которая заключается в способности перемещать заданный объём зерна в единицу времени. В данном контексте совершенствование конструктивно-режимных параметров ленточного транспортера для работы с сильно засоренными зерновыми культурами имеет принципиальное значение с точки зрения перспектив улучшения его динамических характеристик и повышения производительности. Повышение производительности ленточных транспортёров чрезвычайно важно для сельскохозяйственных предприятий Республики Казахстан, деятельность которых непосредственно связана с выращиванием зерновых культур, их транспортировкой, хранением и переработкой.

Литературный обзор. Е.Ю. Шаяхметов в научном исследовании особенностей конструктивного и технологического обеспечения ленточных конвейеров, функционирование которых происходит в сложных условиях, обращает внимание на тот факт, что ленточный конвейер достаточно широко применяется в сельском хозяйстве при

необходимости перемещения зерновых культур. По мнению учёного, динамические характеристики ленточных транспортёров имеют существенное значение с точки зрения их производительности, поскольку влекут за собой экономические потери. Этим обуславливаются требования к их составным элементам: роликам (опорным и прямым), конвейерной ленте, приводу и конструктивным элементам (Шаяхметов, 2017).

Научно-исследовательский коллектив в составе Т.О. Чигамбаева, С.А. Юсуповой и Д.Е. Бижанова рассмотрел ряд проблемных аспектов применения ленточных транспортёров в различных промышленных отраслях для перемещения сыпучих грузов. По мнению учёных, повышение скорости ленты транспортёра, увеличение её ширины и изменение угла наклона боковых роликов до значения 45° в совокупности способствуют значительному повышению производительности транспортёра (Chigambaev, Yusupova, Bizhanov, 2021). Таким образом, отмечается непосредственная зависимость производительности агрегата от его динамических характеристик.

В свою очередь А. Турдалиев и А. Ильясова рассмотрели в совместной научной работе вопросы влияния изменения динамических характеристик транспортёрной ленты на производительность транспортёра в контексте изменений в её поперечном движении. Авторы отмечают, что свободное поперечное движение ленты транспортёра при усложнении эксплуатационных условий, связанных с необходимостью перемещения засоренных зерновых культур, приводит к ухудшению динамических характеристик агрегата и может стать причиной его преждевременного выхода из строя. По мнению учёных, выход может быть найден в разработке математической модели изменений динамики движения транспортёрной ленты, внедрение которой будет способствовать совершенствованию конструктивно-режимных параметров ленточного транспортера (Турдалиев, Ильясова, 2021).

В. Ву с соавторами провели научное исследование методов повышения урожайности и качества хранения зерна, в котором затронули вопросы использования ленточных транспортёров. По мнению учёных, совершенствование конструктивно-режимных параметров ленточного транспортера для работы с сильно засоренными зерновыми культурами, имеет существенное значение с точки зрения обеспечения необходимых условий для перемещения и складирования зерна (Wu and others, 2022).

С. Салембир с соавторами провели совместное научное исследование общих принципов проектирования оборудования для предприятий аграрного сектора экономики. Отмечено, что инновации в сельскохозяйственной технике в последнее время получили широкое распространение. По мнению ученых, инновационные разработки в сфере транспортировки и хранения зерновых культур должны включать в себя меры по совершенствованию динамических характеристик ленточных транспортеров для работы с сильно засоренными зерновыми культурами, что позволит увеличить их производительность и повысить качество транспортировки зерна (Salembier and others, 2020).

Основной целью данного научного исследования является изучение динамических свойств ленточных транспортёров, которые в настоящий момент широко применяются в сельском хозяйстве Казахстана для работы с зерновыми культурами.

Материалы и методы исследования. Данная научно-исследовательская работа предполагает проведение теоретического исследования основных принципов построения конструкции и организации движения ленточного транспортёра в разрезе изучения перспектив их совершенствования. Теоретическую базу работы составляют результаты анализа ряда исследований в области разработки и внедрения в практику предприятий аграрного сектора экономики ленточных транспортёров, предназначенных для работы с зерновыми культурами. Научное исследование было проведено на базе НАО «Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы».

Применение теоретического исследования ключевых принципов функционирования ленточного транспортёра в контексте перспектив усовершенствования его конструктивных и динамических характеристик позволило определить основные задачи применения ленточных транспортёров в сельском хозяйстве и составить классификацию данного рода технологических устройств. Теоретическое исследование также позволило установить основные типы ленточных транспортёров, используемых в аграрном секторе Казахстана для работы с зерновыми культурами, и ключевые динамические характеристики, имеющие принципиальное значение с точки зрения эффективности их функционирования.

В качестве материалов научного исследования были использованы актуальные в Республике Казахстан отраслевые стандарты, определяющие перечень нормативов при использовании ленточных транспортёров для работы с зерновыми культурами. В частности, согласно требованиям ГОСТ 22647-77 была получена формула для определения допустимого момента начала вращения ролика и барабана:

$$M = \theta_m \frac{D}{2}. \quad (1)$$

Кроме того, согласно требованиям стандарта ГОСТ EN 620-2012 была представлена конструктивная схема размещения составных элементов ленточного транспортёра. Использование пособия по проектированию конвейерного транспорта (ленточные транспортёры) СНиП 2.05.07-85 позволило получить выражение для определения длины транспортёрной ленты, учитывающее ряд ключевых конструктивных параметров ленточного транспортёра:

$$L_s = \sum L_n + \sum l_n + \left(\frac{\pi}{360}\right) (\sum \alpha_n D_n + 2 \sum \varphi_n R_n), \quad (2)$$

и выражение для расчёта производительности:

$$Q = KB^2 \rho v. \quad (3)$$

Использование указанных материалов позволило получить выражение, определяющее зависимость скорости движения ленточного транспортёра от производительности, угла наклона ленты и плотности перемещаемого на транспортёре засоренного зерна:

$$B = \sqrt{\frac{Q}{\rho v t g \varphi}}. \quad (4)$$

Для объективной оценки уровня обеспечения отсутствия проскальзывания ленты транспортёра по барабану было использовано неравенство Эйлера и получено выражение

$$F_{л} \leq F_0 e^{f\alpha}. \quad (5)$$

На основании приведенных выше формул было получено выражение для определения производительности ленточного зернового транспортёра, которое представлено в виде соответствующего равенства. На основании значения производительности ленточного конвейера был определён параметр натяжения ленты зернового транспортёра:

$$F_{л} = CF_0. \quad (6)$$

На основании данных, представленных в выражении (6), было получено равенство, отображающее величину тягового усилия ленты зернового транспортёра:

$$F_T = \sum W = F_L - F_0, \quad (7)$$

которое послужило основанием для получения выражения величины тягового усилия, передаваемого от приводящего вала непосредственно к ленте транспортёра при установленных параметрах угла обхвата α и затухающего натяжения F_0 :

$$F_{Tv} = F_0(e^{f\alpha} - 1). \quad (8)$$

Из данного равенства, в свою очередь, было получено выражение для расчёта величины натяжения ленты зернового транспортёра во время работы по перемещению зерна:

$$F_L = F_0 \frac{e^{f\alpha}}{K_3}. \quad (9)$$

Результаты и их обсуждения. Современные разработчики ленточных транспортёров в Республике Казахстан и в других странах при создании данных агрегатов руководствуются принятыми государственными стандартами. В противном случае, инстанции, ответственные за контроль, не выпустят данное технологическое оборудование на рынок. К основным нормативным документам, регламентирующим конструктивно-режимные параметры ленточных транспортёров и актуальным на сегодняшний день на территории Республики Казахстан, относятся: ГОСТ EN 620-2012, ГОСТ 22647-77, пособие по проектированию конвейерного транспорта (ленточные транспортёры) СНиП 2.05.07-85. Научно-исследовательская работа была выполнена на базе Костанайского регионального университета имени А. Байтурсынова.

Межгосударственный стандарт ГОСТ EN 620-2012 полностью идентичен европейскому стандарту EN 620:2002+A1:2010 и определяет комплекс требований к оборудованию и системам непрерывной погрузки сыпучих материалов. Согласно положениям данного нормативного документа, ленточный транспортёр определяется как устройство, включающее в себя резиновую или полимерную транспортёрную ленту с набором конструктивных элементов. Движение ленты осуществляется за счёт запуска приводного барабана на одном конце и прохождения данной ленты через свободно вращающийся барабан на другом конце. Для поддержки внешней поверхности ленты применяются ролики свободного вращения, опорные ролики или специальные настилы. Угол наклона ленточного транспортёра определяется типом ленты и консистенцией транспортируемого материала (в данном исследуемом случае – зерновой культуры) (GOST EN 620-2012, 2012).

Ленточный транспортёр для зерна предназначен для решения следующих задач:

- транспортировка зерновых культур;
- переработка отходов промышленного производства зерна;
- формирование системы транспортной логистики компании-производителя зерновых культур.

Использование ленточных транспортёров даёт возможность значительно повысить скорость обработки зерновых культур, что обеспечивает рост финансовых показателей предприятия – зернового производителя (Belt conveyor for grain: purpose, types, advantages, 2022).

На рис. 1 представлена классификация ленточных транспортёров, которые используются для работы с зерновыми культурами. Общий вид ленточного зернового транспортёра представлен на рис. 2.

В табл. 1 представлены технические характеристики ряда моделей ленточных транспортёров, которые на сегодняшний день используются в сельскохозяйственном секторе Республики Казахстан.

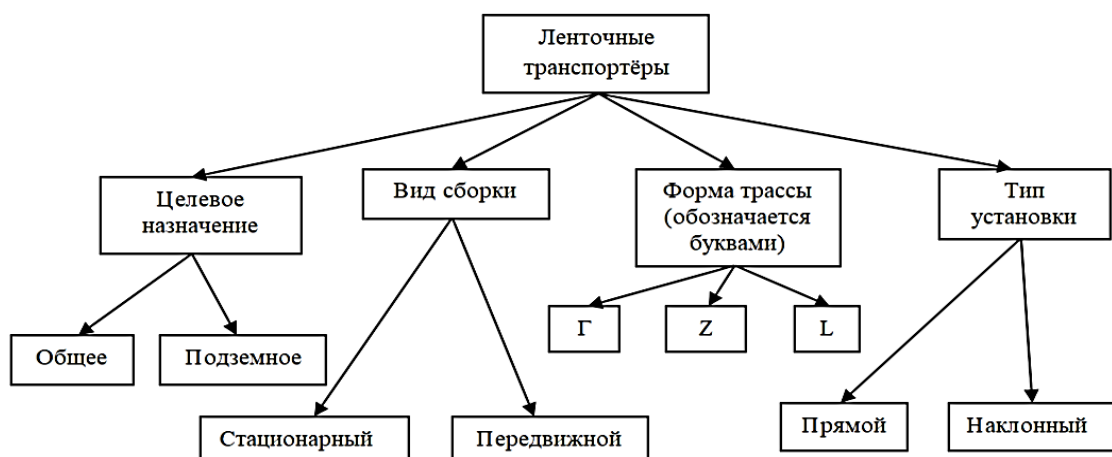


Рисунок 1. Классификация ленточных транспортёров

Примечание – составлено автором



Рисунок 2. Ленточный зерновой транспортёр

Примечание – составлено автором на основе (Belt conveyors, 2023)

Таблица 1. Технические характеристики моделей ленточных транспортёров

Модель	Производительность (тонн/час)	Скорость движения ленты (м/с)	Ширина ленточного полотна (мм)
DMT OVC 400	60	1,8	400
DMT OVC 500	120	1,8	500
DMT OVC 600	240	1,8	600
DMT OVC 800	370	1,8	800
DMT OVC 1000	470	1,8	1000
DMT OVC 1200	580	1,8	1200

Примечание – составлено автором на основе (Belt conveyors, 2023)

Ленточные транспортёры используются для перемещения зерна на расстояния 10-12 километров и более. Приводная станция конвейера включает в себя электродвигатель, барабан, редуктор, а также систему соединительных муфт. Для загрузки зерна на ленту транспортёра применяется воронка, разгрузка производится через концевой барабан либо барабанный (плунжерный) сбрасыватель. Передвижные ленточные транспортёры

применяются для работ по погрузке-разгрузке зерна, в целях повышения мобильности монтируются на колесном ходу.

Среди основных характеристик ленточных транспортёров, которые используются на элеваторах для работы с зерновыми культурами на территории Республики Казахстан, следует отметить:

1. Рабочий процесс транспортёра базируется на системе приводов. Они размещены в барабанах, по которым движется лента. Приводные барабаны являются ключевым оборудованием ленточного зернового транспортера. Барабаны могут иметь одну или две консоли вала, предназначенные для контакта с приводами. Консоли размещаются симметрично по отношению к оси ленточного транспортера, который соединяет пару механизмов приводов. Барабаны с двумя консолями на ленточном транспортере предназначены для дублированных приводных механизмов. При этом в работе пребывает один привод, а другой является запасным и используется для подстраховки.

2. Выпуклые участки ленточного транспортёра содержат не приводные барабаны вместо роликовых нижних опор. Они применяются в качестве отклоняющих барабанов в хвостовой и головной частях ленточного зернового транспортёра.

3. На ленточных транспортёрах применяется оцинкованный короб, одна секция которого может иметь длину до трёх метров. В основании ленточного транспортёра размещены втулки, выполненные из антистатических материалов.

4. Лента транспортёра имеет повышенную износостойчивость. В том случае, если конструкция ленточного транспортёра предусматривает наличие вспомогательных бортов, допускается установка желобных или прямых роликовых опор.

Закрытые ленточные транспортёры используются для перемещения гранулированных зерновых культур на необходимое расстояние. Транспортировка производится на ленте при помощи роликов, при этом в целях предупреждения заносов ведущий ролик покрывается резиной. Конструктивно предусмотрены смотровые отверстия, которые также служат для очистки гранулированного зерна при необходимости и обслуживания ленты.

Общий вид закрытого ленточного зернового транспортёра представлен на рис. 3.

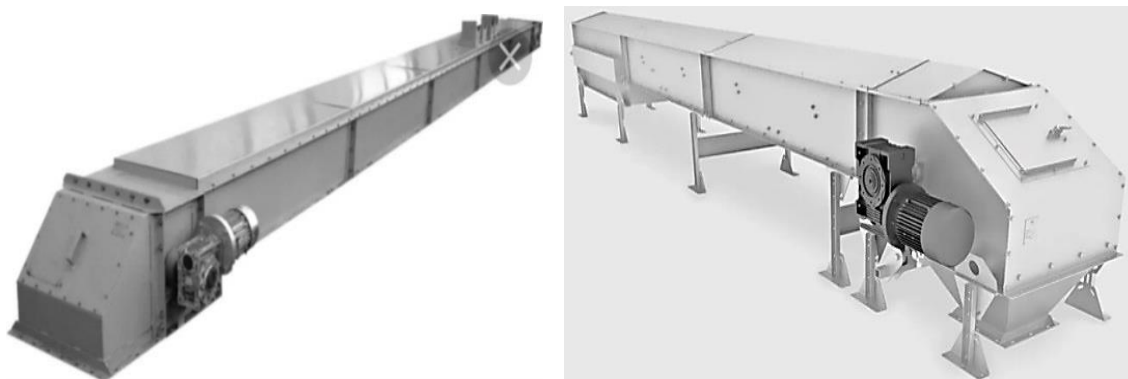


Рисунок 3. Закрытый ленточный зерновой транспортёр

Примечание – составлено автором на основе (Closed belt conveyors, 2023)

В табл. 2 представлены технические характеристики ряда моделей закрытых ленточных транспортёров, которые на сегодняшний день применяются в сельскохозяйственных работах по сбору, транспортировке и хранению зерна в аграрных предприятиях Республики Казахстан.

На рис. 4 представлена схема крепления элементов ленточного транспортёра.

Таблица 2. Технические характеристики моделей ленточных транспортёров закрытого типа

Модель	Производительность (тонн/час)	Скорость движения ленты (м/с)	Ширина ленточного полотна (мм)
DMI SVC 400	60-120	1,5-3,5	400
DMI SVC 500	120-240	1,5-3,5	500
DMI SVC 600	160-240	1,5-3,5	600
DMI SVC 700	240-420	1,5-3,5	700
DMI SVC 800	260-550	1,5-3,5	800
DMI SVC 1000	370-750	1,5-3,5	1000
DMI SVC 1200	470-950	1,5-3,5	1200
DMI SVC 1300	580-1100	1,5-3,5	1300

Примечание – составлено автором на основе (Closed belt conveyors, 2023)

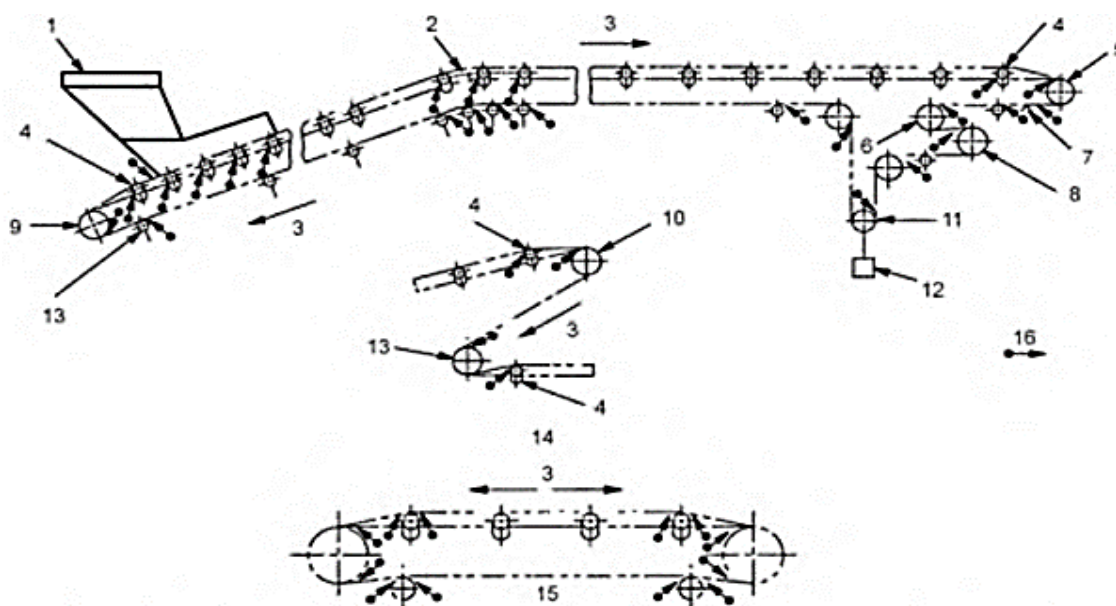


Рисунок 4. Конструктивная схема крепления элементов ленточного транспортёра

Примечание – составлено автором на основе (GOST EN 620-2012, 2012)

Цифрами на рис. 4 обозначены:

- 1 – загрузочная камера;
- 2 – область размещения роликовых опор криволинейного участка транспортёра;
- 3 – вектор движения транспортёрной ленты;
- 4 – роликовая опора переходного типа;
- 5 – барабан конечный передний;
- 6 – барабан оборотный;
- 7 – скребок;
- 8 – барабан приводящий;
- 9 – барабан конечный задний;
- 10 – барабан разгрузочной камеры;
- 11 – барабан натяжения;
- 12 – противовес натяжения вертикального;

- 13 – барабан отклоняющий;
- 14 – разгрузочная камера стандартная;
- 15 – лента возвратная;
- 16 – зона затягивания.

Динамические характеристики ленточных транспортёров для работы с засоренными зерновыми культурами

Параметры свободного вращения роликов и барабанов ленточного транспортёра устанавливаются согласно положениям ГОСТ 22647-77. Для определения допустимого момента начала вращения ролика и барабана используется формула (GOST 22647-77, 1977)

$$M = \theta_m \frac{D}{2}, \quad (10)$$

где: θ – коэффициент сопротивления вращению, для ленточных зерновых транспортёров принимается равным 0,04 (ролики) и 0,07 (барабаны);

m – масса частей вращения ролика или барабана (кг);

D – наружный диаметр барабана или ролика (см).

Совершенствование конструктивно-режимных параметров ленточного транспортера для работы с сильно засоренными зерновыми культурами предполагает необходимость математического обоснования оптимальных режимов его работы. В данном контексте, принимая во внимание расчётную производительность транспортера, для определения ширины ленты следует воспользоваться уравнением:

$$B = \sqrt{\frac{Q}{\rho v t g \varphi}}, \quad (11)$$

где: Q – производительность зернового ленточного транспортёра (кг/с);

ρ – плотность смеси зерна с сором на ленте транспортёра (кг/м³);

v – скорость движения транспортёрной ленты (м/с);

φ – угол естественного уклона транспортируемой смеси на ленте (рад).

Оценка уровня обеспечения отсутствия проскальзывания ленты транспортёра по барабану производится с использованием неравенства Эйлера:

$$F_n \leq F_0 e^{f\alpha}, \quad (12)$$

где: f – динамический коэффициент трения ленты об барабан;

α – угол обхватывания лентой барабана привода транспортёра.

Производительность ленточного транспортёра определяет его способность перемещать определённый объём зерна в единицу времени (измеряется в т/ч). Согласно положениям СНиП 2.05.07-85, регламентирующего последовательность расчёта динамических параметров ленточных транспортёров, производительность ленточного зернового транспортёра также может быть выражена формулой (13):

$$Q = KB^2 \rho v, \quad (13)$$

где: K – коэффициент производительности, значение которого определяется формой ленты транспортёра и размерами, которые данную форму устанавливают.

Для определения силы натяжения ленты транспортёра неравенство (3) разрешается посредством следующего уравнения:

$$F_n = CF_0, \quad (14)$$

где C – численный коэффициент, который определяется посредством специальных расчётов и экспериментов.

Величина тягового усилия ленты транспортёра определяется посредством складывания векторов всех сил сопротивления её движению, что аналогично разнице значений нарастающего и затухающего натяжения:

$$F_T = \sum W = F_l - F_0 . \quad (15)$$

Значение тягового усилия, которое передаётся от приводящего вала непосредственно к ленте транспортёра при заданных, известных параметрах угла обхвата α и затухающего натяжения F_0 , можно определить по уравнению:

$$F_{Tv} = F_0(e^{f\alpha} - 1) . \quad (16)$$

Из уравнения (7) можно получить параметр нарастания натяжения ленты зернового транспортёра:

$$F_l = F_0 \frac{e^{f\alpha}}{K_3} , \quad (17)$$

где K_3 – расчётный числовой коэффициент запаса.

Согласно действующим положениям СНиП 2.05.07-85 для определения суммарной длины ленты транспортёра используется выражение

$$L_s = \sum L_n + \sum l_n + \left(\frac{\pi}{360}\right)(\sum \alpha_n D_n + 2 \sum \varphi_n R_n) , \quad (19)$$

где: L_n – длина n -го прямого участка ленты;

l_n – длина n -го стыка;

α_n – угол охвата транспортерной лентой n -го барабана;

D_n – диаметр n -го барабана;

φ_n – угол дуги n -й окружности, по дуге которой направлена лента зернового транспортёра;

R_n – радиус n -й окружности.

Представленные выражения наглядно иллюстрируют наличие прямой зависимости производительности ленточного транспортёра от ширины и длины ленты, скорости её движения и плотности смеси зерна и сора (при значительной засоренности зерновой смеси). При этом следует обратить внимание на тот факт, что высокая плотность перемещаемой смеси обуславливает высокое натяжение ленты транспортёра, что негативно сказывается на длительности её эксплуатации и приводит к преждевременному износу. Данное обстоятельство следует принимать во внимание при разработке конструкции ленточных транспортёров, предназначенных для работы на предприятиях сельскохозяйственной отрасли, где предполагается транспортировка только засоренных зерновых культур.

Выражение (9) отображает зависимость длины транспортёрной ленты от ряда конструктивных параметров, изменение которых при совершенствовании конструкции влечёт за собой изменение параметра длины L_s и неизбежно отразится на динамических характеристиках ленточного транспортёра.

Совершенствование конструктивно-режимных параметров ленточного транспортера для работы с сильно засоренными зерновыми культурами предполагает последовательное повышение его производительности при параллельном снижении показателя натяжения

транспортёрной ленты ($F_{л}$), что препятствует её износу и преждевременному выходу из строя. Исходя из представленных выше зависимостей (7) и (8) данная задача может быть успешно решена за счёт последовательного снижения параметра затухающего натяжения (F_0) и сведения к минимально возможному значению угла обхвата транспортёрной лентой приводного барабана транспортёра. Кроме того, при необходимости возможно внесение изменений в конструкцию ленточного транспортёра, предполагающих технологическое усовершенствование отдельных узлов.

Б. Маршан с соавторами провели научное исследование ряда проблемных аспектов достижения точности и надёжности функционирования современных технологических устройств, предназначенных для работы с сельскохозяйственными культурами. В ходе выполнения данной научной работы были затронуты вопросы применения ленточных транспортёров в работе с зерновыми культурами. Авторы отмечают, что современные технологии точного земледелия предоставляют фермерам широкое поле возможностей для экспериментов в масштабах, определяемых ими самими. В данном контексте вопросы повышения урожайности зерновых культур напрямую связаны с необходимостью последовательного совершенствования динамических характеристик ленточных транспортёров для работы с зерновыми культурами высокой степени засорённости (Marchant and others, 2020). Мнение учёных полностью подтверждается результатами, которые были получены при выполнении данной научной работы, при этом вопросы повышения урожайности зерновых культур требуют более детального изучения, ввиду их существенной практической важности.

Научно-исследовательский коллектив в составе Н.И. Канабарро, М.А. Мазутти и М. до Кармо Феррейра рассмотрел в совместной научной работе ряд вопросов практического применения ленточных транспортёров для транспортировки сильно засоренных зерновых культур, а также сушки листьев на транспортёрной ленте. По мнению учёных, совершенствование конструктивных параметров ленточных транспортёров и правильный выбор режимов их функционирования при работе с зерновыми культурами высокой степени засоренности необходимы для повышения производительности сельскохозяйственных предприятий и развития сельскохозяйственной отрасли в целом (Canabarro, Mazutti, do Carmo Ferreira, 2019). Мнение исследователей полностью подтверждается результатами данного научного исследования, поскольку в нём доказано наличие прямой взаимосвязи между динамическими характеристиками ленточных транспортёров и их производительностью.

В совместном научном исследовании Ф.Г. Морено с соавторами рассмотрели общие принципы применения агропромышленной техники в целях повышения урожайности сельскохозяйственных культур. По мнению авторов, динамические характеристики ленточных транспортёров имеют ключевое значение при планировании операций в области повышения уровня технической оснащённости сельскохозяйственных предприятий, производящих работы по сбору, хранению и транспортировке зерновых культур (Moreno and others, 2023). Мнение исследователей подтверждается результатами данной научной работы, при этом вопросы поиска путей повышения уровня технической оснащённости сельскохозяйственных предприятий требуют более детального изучения, что открывает дополнительные перспективы проведения научных исследований.

В то же время Т. Рирдон с соавторами провели совместное научное исследование роли сельскохозяйственных инноваций, одним из направлений которых является совершенствование конструктивных особенностей транспортёров для перемещения зерновых культур, в вопросах трансформации систем обеспечения продовольствием. Учёные обращают внимание на тот факт, что улучшение режимных и конструктивных параметров ленточных транспортёров для работы с сильно засоренными зерновыми

культурами чрезвычайно важно с точки зрения повышения их производительности, которая выражается в способности данной техники к перемещению заданных объёмов зерна в единицу времени на конкретное расстояние (Reardon and others, 2019). Выводы учёных полностью подтверждаются результатами, которые были получены в ходе выполнения данного научного исследования.

Г. Гебресенбет с соавторами провели совместное научное исследование общих принципов применения современных технологических решений при проектировании сельскохозяйственного оборудования. В частности, учёными отмечается, что при проектировании ленточных транспортёров для работы с зерновыми культурами следует принимать во внимание необходимость совершенствования их конструкции таким образом, чтобы обеспечить достижение высокого уровня динамических характеристик (Gebresenbet and others, 2023). Это обеспечит возможности повышения производительности ленточных транспортёров и позитивно скажется на работе сельскохозяйственных предприятий, преследующих задачи хранения и очистки зерновых культур. Выводы учёных нашли подтверждение в результатах данной научно-исследовательской работы, открывая при этом перспективы изучения вопросов взаимосвязи производительности технологического сельскохозяйственного оборудования и эффективности функционирования предприятий аграрного сектора.

Научно-исследовательский коллектив в лице Н.А. Авьяра с соавторами совместно рассмотрели вопросы практического применения технологического оборудования для транспортировки и хранения продовольственного зерна. По мнению исследователей, присутствие в зерне разнородных примесей значительно затрудняет его хранение и транспортировку, а также оказывает негативное влияние на его общее качество. Формулируется вывод о том, что последовательное совершенствование конструктивно-режимных параметров ленточного транспортёра для работы с сильно засоренными зерновыми культурами необходимо для достижения высоких показателей качества зерна, а также для увеличения общего срока его хранения (Aviara and others, 2022). Выводы группы учёных представляются спорными, поскольку динамические характеристики ленточных транспортёров не оказывают непосредственного влияния на качество зерна и продолжительность его хранения.

Т. Луо с соавторами провели научное исследование ряда проблемных аспектов классификации сорняков сельскохозяйственных культур, в котором затронули вопросы влияния засоренности зерновых на их транспортировку и хранение, а также на изменение параметров динамики ленточных транспортёров, привлекаемых для работы с зерном. По мнению учёных, засоренность зерна негативно влияет на качество и продолжительность его хранения, а также сказывается при транспортировке. При транспортировке засоренного зерна на ленточном транспортёре большое значение имеют возможности совершенствования конструктивных особенностей транспортёров и режимов их работы, поскольку от этого зависит производительность данных технологических устройств (Luo and others, 2023). Именно производительность является одним из основных режимных параметров подобного рода устройств. Выводы группы учёных подтверждаются результатами, которые были получены при выполнении данной научной работы.

В. Ву с группой учёных-исследователей в составе Ф. Шах и Б-Л Мал совместно рассмотрели в научной работе ряд вопросов полегаия зерновых культур, а также их транспортировки и хранения. Исследователи отмечают, что полегаия зерновых культур является одним из факторов, негативно влияющих на урожайность зерновых, а также существенно затрудняющих их транспортировку. По мнению учёных, это выражается в увеличении засоренности зерновых культур при их транспортировке на ленточных транспортёрах, что может стать причиной нарушения режимов работы данных

технологических устройств (Wu, Shah, Mal, 2023). Выводы исследователей представляются спорными, поскольку засоренность зерна напрямую не является причиной нарушения нормального функционирования ленточных транспортёров.

В свою очередь, С. Джафари в научно-исследовательской работе, направленной на изучение различных аспектов послеуборочной обработки сельскохозяйственных продуктов с применением современных технологических устройств отмечает, что конструктивные и режимные параметры ленточного конвейера оказывают существенное влияние на качество и скорость транспортировки зерна. Исследователь обращает внимание на тот факт, что при сортировке зерновых культур и их перемещении к месту хранения следует принимать во внимание как скорость движения транспортёрной ленты, так и её ширину, поскольку указанные параметры определяют производительность транспортёра в целом (Jafari, 2021). Выводы исследователя полностью подтверждаются результатами, которые были получены при выполнении данной научно-исследовательской работы.

Г. Бхуллар и Н. Бхуллар в совместном научном исследовании рассмотрели общие принципы развития устойчивого сельского хозяйства, где затронули вопросы применения ряда технологических устройств. В частности, исследователи отметили, что производство сельскохозяйственных культур предполагает применение современных механизмов для их транспортировки, одним из которых является ленточный транспортёр. Отмечается, что оптимальное сочетание конструктивных и режимных параметров транспортёра (скорость движения и ширина ленты, мощность и производительность) определяют эффективность его применения при транспортировке зерна к месту хранения и при уборочных работах, когда необходимо быстро и качественно провести его уборку (Bhullar G., Bhullar N., 2012). Выводы исследователей полностью подтверждаются результатами, которые были получены при выполнении данного научного исследования.

Таким образом, обсуждение результатов данной научной работы в контексте их аналитического сравнения с результатами и выводами других учёных, проводивших изучение тематик, прямо или косвенно связанных с исследованиями динамических характеристик ленточных транспортёров для работы с сильно засоренными зерновыми культурами, продемонстрировало их соответствие по ключевым направлениям научного исследования.

Заключение. В ходе выполнения данного научного исследования удалось установить, что показатель производительности ленточного конвейера, предназначенного для работы с зерновыми культурами, напрямую зависит от скорости движения ленты, её ширины и длины, а также параметра плотности перемещаемого сильно засоренного зерна. Таким образом, проведенное исследование динамических характеристик ленточного транспортёра для работы с сильно засоренными зерновыми культурами продемонстрировало наличие степени влияния засоренности зерновой смеси на производительность ленточного транспортёра, по которому она перемещается. При этом засоренность перемещаемого зерна негативно сказывается на длительности срока эксплуатации ленты транспортёра, поскольку вызывает её дополнительное натяжение и усиливает износ.

Скорость движения транспортёрной ленты, её ширина, а также параметр производительности являются основными динамическими характеристиками ленточного транспортёра, предназначенного для работы с сильно засоренными зерновыми культурами. Перспективы совершенствования конструктивных и режимных параметров исследуемого агрегата заключаются в последовательном повышении его производительности при параллельном снижении параметра нарастания натяжения транспортёрной ленты (F_n). Это обуславливает повышение эффективности практического применения ленточных транспортёров для проведения работ по погрузке зерна и транспортировке его

к местам хранения, что имеет существенное значение с точки зрения организации деятельности сельскохозяйственных предприятий Казахстана, специализирующихся на проведении работ по сбору, транспортировке и хранению зерновых культур.

Постепенное совершенствование конструктивных характеристик и отладка режимов функционирования ленточного транспортера, используемого для работы с сильно засоренными зерновыми культурами, создает предпосылки для улучшения его динамических характеристик. Это необходимо с точки зрения создания оптимальных условий для сбора зерна во время зерноуборочной кампании и транспортировки его к местам хранения. При этом следует уделять внимание вопросам очистки зерна в местах хранения во избежание его порчи и преждевременного прихода в негодное состояние.

Перспективы дальнейших научных исследований в направлении, которое определяется тематикой данной работы, заключаются в возможности практического применения их результатов при проектировании высокопроизводительных ленточных конвейеров, предназначенных для работы с зерновыми культурами на предприятиях аграрного сектора экономики Республики Казахстан.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Alighaleh P., Gundoshmian T.M., Alighaleh S., Rohani A. (2023). Feasibility and reliability of agricultural crop height measurement using the laser sensor array, *Information Processing in Agriculture*. Vol. 11, no. 2, 228-236, <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2023.02.005>
- Aviara N.A., Liberty J.T., Olatunbosun O.S., Shoyombo H.A., Oyeniya S.K. (2022). Potential application of hyperspectral imaging in food grain quality inspection, evaluation and control during bulk storage, *Journal of Agriculture and Food Research*, Vol. 8, 2666-1543, <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100288>
- Belt conveyors (2023), <https://www.dehsetiler.kz/products/grain-handling-equipments/belt-conveyors>
- Bhullar G., Bhullar N. (2012). *Agricultural Sustainability*, London, Academic Press <https://www.elsevier.com/books/agricultural-sustainability/bhullar/978-0-12-404560-6>
- Canabarro N.I., Mazutti M.A., do Carmo Ferreira M. (2019). Drying of olive (*Olea europaea* L.) leaves on a conveyor belt for supercritical extraction of bioactive compounds: Mathematical modeling of drying/extraction operations and analysis of extracts, *Industrial Crops and Products*, Vol. 136, 140-151, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.004>
- Cesco S., Sambo P., Borin M., Basso B., Orzes G., Mazzetto F. (2023). Smart agriculture and digital twins: Applications and challenges in a vision of sustainability. *European Journal of Agronomy*. Vol. 146, 1161-1176, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126809>
- Closed belt conveyors, 2023, <https://www.dehsetiler.kz/products/grain-handling-equipments/enclosed-belt-conveyors>
- Fu X., Niu H. (2022). Key technologies and applications of agricultural energy Internet for agricultural planting and fisheries industry, *Information Processing in Agriculture*. Vol.10, 416-437, <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2022.10.004>
- Gebresenbet G., Bosona T., Patterson D., Persson H., Fischer B., Mandaluniz N., Chirici G., Zacepins A., Komasilovs V., Pitulac T., Nasirahmadi A. (2023). A concept for application of integrated digital technologies to enhance future smart agricultural systems. *Smart Agricultural Technology*. Vol. 5, <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100255>
- GOST EN 620-2012, 2012, <http://vsegost.com/Catalog/55/55149.shtml>
- GOST 22647-77, 1977, <https://meganorm.ru/Data2/1/4294742/4294742143.pdf>
- Jafari S. (2021). *Postharvest and Postmortem Processing of Raw Food Materials*, Soston, Woodhead Publishing. <https://www.elsevier.com/books/postharvest-and-postmortem-processing-of-raw-food-materials/jafari/978-0-12-818572-8>
- Ленточный транспортер для зерна: назначение, виды, преимущества. (2022) <https://csharpcoderr.com/28800> // Lentochnyj transporter dlja zerna: naznachenie, vidy, preimushhestva. (2022), <https://csharpcoderr.com/28800>.
- Higgins V., Van der Velden D., Bechtet N., Bryant M., Battersby J., Belle M., Klerkx L. (2023). Deliberative assembling: Tinkering and farmer agency in precision agriculture implementation. *Journal of Rural Studies*. Volume 100, 747-792, <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2023.103023>

- Luo T., Zhao J., Gu Y., Zhang S., Qiao X., Tian W., Han Y. (2023), Classification of weed seeds based on visual images and deep learning. *Information Processing in Agriculture*. Vol. 10, no. 1, 40-51. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.10.002>
- Marchant B., Rudolph S., Roques S., Kindred D., Gillingham V., Welham S., Coleman C., Sylvester-Bradley R., 2020, Establishing the precision and robustness of farmers' crop experiments. *Field Crops Research*. Vol. 230, 31-45. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.10.006>
- Moreno F.G., Zimmermann G.G., Jasper S.P., da Silva Ferraz R., Savi D., 2023, Sensors installation position and its interference on the precision of monitoring maize sowing. *Smart Agricultural Technology*. Vol. 4, 1255-1369 <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100150>
- Reardon T., Echeverria R., Berdegue J., Minten B., Liverpool-Tasie S., Tschirley D., Zilberman D. (2019), Rapid transformation of food systems in developing regions: Highlighting the role of agricultural research & innovations. *Agricultural Systems*. Vol. 172, 47-59. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.01.022>
- Richard D., Liembrock-Rosch L., Kessler S., Stoll E., Zimmer S., 2023, Soybean yield response to different mechanical weed control methods in organic agriculture in Luxembourg. *European Journal of Agronomy*. Vol. 147, 1162-1184, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126842>
- Salembier C., Segrestin B., Sinoir N., Templier J., Weil B., Meynard J-M. (2020). Design of equipment for agroecology: Coupled innovation processes led by farmer-designers. *Agricultural Systems*. Vol. 183, 1242-1264, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102856>
- СНИП 2.05.07-85. (1985) https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31282628&show_di=1&pos=2;-122#pos=2;-122 // СНІР 2.05.07-85. (1985) https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=31282628&show_di=1&pos=2;-122#pos=2;-122
- Турдалиев А., Ильясова А. (2021). Исследование поперечного движения конвейерной ленты мощных ленточных конвейеров. *Бюллетень Каз НТУ им.К.И.Сатпаева*, №7, 72-74// Turdaliev A. Ilyasova A. (2021). Study of the transverse movement of the conveyor belt of powerful belt conveyors. *Bulletin of the KazNTU named after K.I. Satpaeva*, №7, pp. 72-74
- Чигамбаев Т.О., Юсупова С.А., Бижанов Д.Е. (2021). Казахстан. Исследование системы транспортировки ленточным конвейером на промышленных предприятиях. *Вестник Каз АТК*. № 1(116), с. 242-248// Chigambaev T.O., Jusupova S.A., Bizhanov D.E. (2021). Kazakhstan. Issledovanie sistemy transportirovki lentochnym konvejerom na promyshlennyh predpriyatijah, *Vestnik KazATK* No 1(116), 2021, s. 242-248
- Шаяхметов Е.Я. (2017), Конструктивное и технологическое обеспечение качества роликкоопор ленточных конвейеров, работающих в тяжелых условиях. Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD) Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева // Shajahmetov E.Ja. (2017), Konstruktivnoe i tehnologicheskoe obespechenie kachestva rolkkoopor lentochnyh konvejerov, rabotajushhih v tzhzhelyh uslovijah. Dissertacija na soiskanie stepeni doktora filosofii (PhD) Kazahskij nacional'nyj issledovatel'skij tehnikeskij universitet imeni K.I. Satpaeva
- Wu W., Wang Y., Wang L., Xu H., Zorb C., Geilfus C-M., Xue C., Sun Z., Ma W. (2022). Booting stage is the key timing for split nitrogen application in improving grain yield and quality of wheat – A global meta-analysis. *Field Crops Research*. Vol. 287, 965-982, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108665>
- Wu W., Shah F., Ma B-L., 2023, Understanding of crop lodging and agronomic strategies to improve the resilience of rapeseed production to climate change. *Crop and Environment*. Vol. 1, Issue 2, pp.133-144. DOI:10.1016/j.crope.2022.05.005

Information about authors

Bekmyrza Zhumash Aitzhanuly – Doctoral student of the Department of Mechanical Engineering of Non-profit joint-stock company «Kostanay Regional University named after Akhmet Baitursynuly». Kostanay. Republic of Kazakhstan, 5112431@mail.ru,+77015112431

ЭЛЕКТРОНИКА
ЭЛЕКТРОНИКА
ELECTRONICS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_40
MPHTI 45.43.01

Д.Г. Инсепов

Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева, г. Алматы, Казахстан
E-mail: insepov_dauren83@mail.ru*

ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА НЕФТЕПРОВОДОВ

МҰНАЙ ҚҰБЫРЛАРЫН ИНДУКЦИЯЛЫҚ ҚЫЗУҒА АРНАЛҒАН ЖИІЛІКТІ ТҮРЛЕРДІКТІҢ ЖҰМЫС ПРИНЦИПТЕРІ

PRINCIPLES OF OPERATION OF A FREQUENCY CONVERTER FOR INDUCTION HEATING OF OIL PIPELINES

Аннотация. Статья обеспечивает всестороннее исследование преобразователей частоты и их решающей роли в индукционном нагреве нефтепроводов. В статье подробно изложены основные характеристики преобразователей частоты, включая входную и выходную частоты, номинальную мощность, КГД, номинальное напряжение и ток, тип преобразования, методы управления, функции защиты, а также размеры и вес. Рассмотрены особенности преобразователей частоты, предназначенных для индукционного нагрева нефтепроводов, подчеркивая их значение в регулировании процесса нагрева и обеспечении эффективного использования энергии. Подробно объясняется принцип работы этих преобразователей, который включает преобразование стандартного источника переменного тока в высокочастотный источник переменного тока, что дает четкое представление об их работе. Обсуждаются принципы индукционного нагрева, включая потери на гистерезис и потери на вихревые токи, и то, как эти принципы способствуют эффективному и контролируемому нагреву нефтепровода. Автор также подчеркивает принципы энергосбережения преобразователей частоты, объясняя, как регулирование скорости позволяет эффективно использовать энергию и способствует экономии электроэнергии в процессе нагрева.

Новизна исследования заключается в интеграции технологий ИИ в процесс управления преобразователями частоты, что открывает новые горизонты для повышения энергоэффективности и надежности индукционного нагрева в нефтяной промышленности.

Данная статья представляет интерес для тех, кто интересуется преобразователями частоты и их применением для обогрева нефтепроводов, предлагая полное понимание их роли, принципов работы.

Ключевые слова: преобразователь частоты, индукционный нагрев, нефтепровод, высокочастотная мощность, энергосбережение.

Аңдатпа. Мақалада жиілік түрлендіргіштері және олардың мұнай құбырларын индукциялық жылытудағы маңызды рөлі жан-жақты зерттеледі. Мақалада жиілік түрлендіргіштерінің негізгі сипаттамалары, соның ішінде кіріс және шығыс жиілігі, қуат рейтингі, тиімділік, кернеу мен ток рейтингтері, түрлендіру түрі, басқару әдістері, қорғаныс функциялары, өлшемі мен салмағы қарастырылады. Мақалада мұнай құбырларын индукциялық жылытуға арналған жиілікті түрлендіргіштердің ерекшеліктері қарастырылып, олардың жылу процесін реттеудегі және энергияны тиімді пайдалануды қамтамасыз етудегі маңыздылығына тоқталады. Стандартты айнымалы ток көзін жоғары жиілікті айнымалы ток көзіне түрлендіруді қамтитын бұл түрлендіргіштердің жұмыс принципі оқырмандарға олардың жұмысы туралы нақты түсінік беретін егжей-тегжейлі түсіндіріледі. Сонымен қатар, мақалада индукциялық қыздыру принциптері, соның ішінде гистерезис шығындары мен құйынды ток шығындары және бұл принциптер мұнай құбырын тиімді және бақыланатын жылытуға қалай ықпал ететіні талқыланады. Сондай-ақ автор жылдамдықты басқарудың энергияны тиімді пайдалануға

мүмкіндік беретінін және қыздыру процесінде энергияны үнемдеуге көмектесетінін түсіндіре отырып, ауыспалы жылдамдықты жетектердің энергияны үнемдеу қағидаттарын атап көрсетеді.

Зерттеудің жаңалығы мұнай өнеркәсібіндегі индукциялық қыздырудың энергия тиімділігі мен сенімділігін арттыру үшін жаңа көкжиектерді ашатын жиілік түрлендіргіштерін басқару процесіне AI технологияларын біріктіруде.

Бұл мақала жиілікті түрлендіргіштерге және олардың мұнай құбырларын жылытуға арналған қолданылуына қызығушылық танытып, олардың рөлі мен жұмыс принциптерін толық түсінуді ұсынады.

Түйін сөздер: жиілікті түрлендіргіш, индукциялық қыздыру, мұнай құбыры, жоғары жиілікті қуат, энергия үнемдеу.

Abstract. The article provides a comprehensive study of frequency converters and their critical role in induction heating of oil pipelines. The article details the main characteristics of frequency converters, including input and output frequency, power rating, efficiency, voltage and current ratings, conversion type, control methods, protection functions, and size and weight. The article discusses the features of frequency converters designed for induction heating of oil pipelines, emphasizing their importance in regulating the heating process and ensuring efficient use of energy. The working principle of these converters, which involves converting a standard AC source into a high frequency AC source, is explained in detail, giving readers a clear understanding of their workings. In addition, the article discusses the principles of induction heating, including hysteresis losses and eddy current losses, and how these principles contribute to efficient and controlled heating of an oil pipeline. The author also highlights the energy-saving principles of variable speed drives, explaining how speed control allows for efficient use of energy and helps save energy during the heating process.

The novelty of the study lies in the integration of AI technologies into the process of controlling frequency converters, which opens up new horizons for improving the energy efficiency and reliability of induction heating in the oil industry.

This article is of interest to those interested in frequency converters and their application for heating oil pipelines, offering a complete understanding of their role, operating principles.

Keywords: frequency converter, induction heating, oil pipeline, high-frequency power, energy saving.

Введение. Актуальность изучения представленной темы значительна в современном промышленном ландшафте. Преобразователи частоты являются неотъемлемой частью нефтяной промышленности, особенно при индукционном нагреве нефтепроводов. Этот процесс жизненно важен для поддержания потока нефти, особенно в холодном климате, где нефть может загустеть и замедлиться. Понимая принципы работы преобразователя частоты, мы можем более эффективно и результативно управлять процессом индукционного нагрева. Такое понимание может привести к существенной экономии энергии, поскольку преобразователь частоты способен регулировать процесс нагрева в зависимости от конкретных потребностей трубопровода.

С экологической точки зрения эта тема также актуальна. Эффективное использование энергии в нефтяной промышленности может помочь снизить общий углеродный след отрасли.

Более того, принципы работы преобразователей частоты не ограничиваются нефтяной промышленностью. Они также могут применяться в других отраслях, где требуется управление электрической частотой.

Изучение этой темы не только актуально, но и крайне важно для специалистов нефтяной отрасли, инженеров-электриков и исследователей, интересующихся преобразователями частоты и их применением.

Материалы и методы исследования. В данной статье применяется несколько методов исследования. Автор провел обзор существующей литературы, посвященной преобразователям частоты и их применению для индукционного нагрева нефтепроводов. Это видно из подробного объяснения принципов работы преобразователей частоты и их характеристик. А также провел технический анализ, в котором рассмотрены компоненты

преобразователя частоты и то, как они взаимодействуют при выполнении функции индукционного нагрева.

Результаты и их обсуждение. Преобразователь частоты представляет собой электронное или электромеханическое устройство, которое преобразует переменный ток одной частоты в переменный ток другой частоты. Это устройство используется для управления частотой входного сигнала в зависимости от требований (Цыба, 2018).

В табл. 1 представлены основные характеристики преобразователей частоты (Wang, 2020).

Таблица 1. Основные характеристики преобразователей частоты

№	Наименование	Функции характеристики
1.	Входная и выходная частоты	Основная функция преобразователя частоты – изменение частоты входного сигнала. Входная частота – исходная частота, которую необходимо преобразовать, выходная частота – желаемая частота после преобразования.
2.	Номинальная мощность	Это максимальная мощность, с которой он может справиться. Обычно она измеряется в ваттах (Вт) или киловаттах (кВт).
3.	КПД	Представляет собой отношение выходной мощности к входной мощности. Обычно оно выражается в процентах. Высокая эффективность означает, что преобразователь тратит меньше энергии в процессе преобразования.
4.	Номинальное напряжение и ток	Представляют собой максимальное напряжение и ток, которые он может выдержать. Эти показатели важны с точки зрения безопасности и производительности.
5.	Тип преобразования	Преобразователи частоты могут выполнять прямое преобразование (из переменного тока в переменный) или косвенное преобразование (из переменного тока в постоянный, а затем из постоянного в переменный). Тип преобразования влияет на сложность и эффективность преобразователя.
6.	Методы управления	Преобразователи частоты могут управляться вручную или автоматически. Ручное управление предполагает регулировку настроек вручную, тогда как автоматическое управление использует систему управления для корректировки настроек в соответствии с требованиями системы.
7.	Функции защиты	Многие преобразователи частоты имеют встроенные функции защиты, предотвращающие повреждение устройства или системы, к которой оно подключено. Эти функции могут включать защиту от перенапряжения, защиту от перегрузки по току и тепловую защиту.
8.	Размер и вес	Размер и вес преобразователя частоты могут влиять на его пригодность для определенных применений. Меньшие и более легкие преобразователи легче устанавливать и использовать в портативных приложениях, тогда как более крупные и тяжелые преобразователи могут быть более подходящими для стационарных приложений.
<i>Примечание – составлено автором или составлено автором на основе (Wang, 2020)</i>		

Преобразователь частоты – это универсальное устройство, которое можно использовать в широком спектре применений: от силовой электроники до телекоммуникаций. Его основные характеристики определяют его производительность, эффективность и пригодность для различных применений (Understanding, 2024).

В данной статье подробно рассмотрим преобразователи частоты, предназначенные для индукционного нагрева нефтепровода.

Преобразователи частоты, предназначенные для индукционного нагрева нефтепроводов (рис. 1), играют решающую роль в регулировании процесса нагрева и обеспечении эффективного использования энергии. Эти преобразователи специально разработаны для удовлетворения требований данного применения и включают в себя принципы и компоненты, которые обеспечивают точный контроль над процессом индукционного нагрева (Isembergenov, 2020).

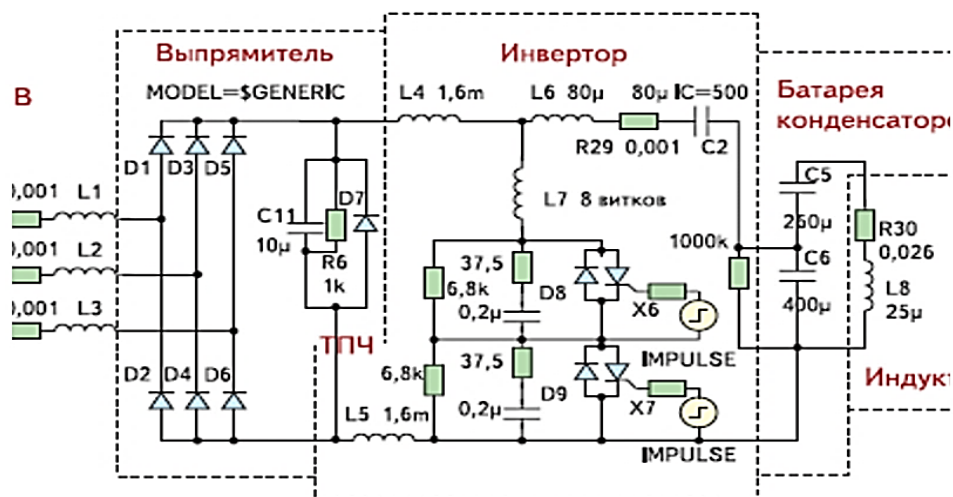


Рисунок 1. Схематическая модель тиристорного преобразователя частоты

Примечание – рисунок заимствован из источника (Валлиулина, 2007)

Устройства индукционного нагрева, предназначенные для нагрева нефтепроводов, обычно работают в определенном диапазоне частот. Радиочастотные (РЧ) индукционные генераторы работают в диапазоне от 100 кГц до 10 МГц, тогда как большинство устройств индукционного нагрева с индукционным контролем частоты имеют диапазон частот от 100 кГц до 200 кГц. Выходная мощность обычно варьируется от 2,5 до 40 кВт для небольших компонентов и приложений и от 50 до 500 кВт для средних и крупных компонентов и приложений (Инсепов, 2016).

Принцип работы преобразователя частоты с индукционным нагревом заключается в преобразовании стандартной мощности переменного тока в высокочастотную мощность переменного тока (рис. 2). Это происходит с помощью схемы преобразования мощности, включающей полумостовую топологию повышающего инвертора (рис. 3). Такая конструкция обеспечивает эффективный и действенный индукционный нагрев, работающий непосредственно от однофазной сети в заданном диапазоне частот от 80 до 200 кГц. Система включает в себя преобразователь постоянного тока в постоянный, сконфигурированный как управляемый источник тока, питающий резонансный инвертор нагрузки постоянного и переменного тока путем управления параллельной цепью резонансной нагрузки. Эта цепь нагрузки состоит из катушки индукционного нагрева и конденсатора коррекции коэффициента мощности, что обеспечивает точный контроль процесса индукционного нагрева (Зинин, 2014).

Принцип работы преобразователя частоты основан на выработке высокочастотной мощности переменного тока, которая необходима для индукционного нагрева. Схема преобразования мощности, включающая топологию повышающего полумостового

инвертора, обеспечивает эффективное преобразование стандартного источника переменного тока в высокочастотный источник переменного тока. Этот процесс имеет решающее значение для достижения точного контроля над процессом индукционного нагрева, обеспечивая оптимальную и эффективную работу в указанном диапазоне частот (Inverter, 2024).

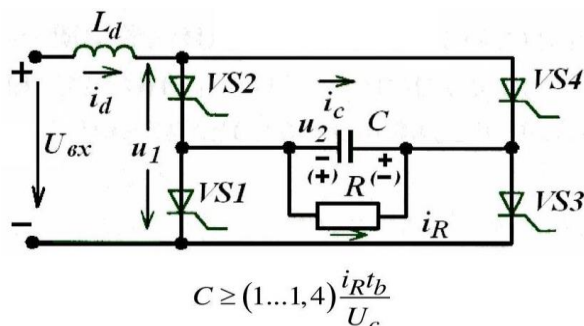


Рисунок 2. Инвертор тока

Примечание – рисунок заимствован из источника (Зинин, 2014)

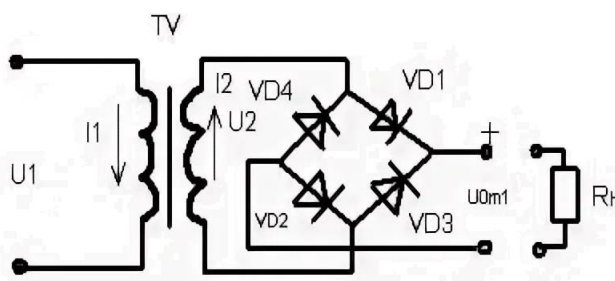


Рисунок 3. Мостовой выпрямитель

Примечание – рисунок заимствован из источника (Зинин, 2014)

Резонансный инвертор нагрузки постоянного тока, работающий от управляемого источника тока преобразователя постоянного тока, играет центральную роль в выработке высокочастотной мощности переменного тока, необходимой для индукционного нагрева. Благодаря использованию параллельной цепи резонансной нагрузки, состоящей из катушки индукционного нагрева и конденсатора коррекции коэффициента мощности, преобразователь частоты обеспечивает точный контроль и регулирование процесса индукционного нагрева. Такая конфигурация позволяет эффективно и результативно использовать высокочастотную мощность переменного тока для нагрева, способствуя повышению общей производительности и надежности системы индукционного нагрева (Shaikh, 2023).

Таким образом, принцип работы преобразователя частоты с индукционным нагревом включает преобразование стандартной мощности переменного тока в высокочастотную мощность переменного тока с помощью схемы преобразования мощности, которая включает топологию полумостового повышающего инвертора. Такая конструкция обеспечивает эффективный и действенный индукционный нагрев, работающий непосредственно от однофазной сети в заданном диапазоне частот. Компоненты и принципы работы системы тщательно разработаны, чтобы обеспечить точный контроль и регулирование процесса индукционного нагрева, что способствует общей эффективности и производительности системы.

В высокочастотных системах индукционного нагрева для нагрева используются два принципа нагрева: потери на гистерезис и потери на вихревые токи (рис. 4). Гистерезисные потери возникают, когда нагреваемый объект представляет собой магнитный материал, тогда как потери на вихревые токи возникают как в магнитных, так и в немагнитных материалах. Переменный ток генерирует вихревые токи в магнитном поле за счет электромагнитной индукции, приводящие к выделению джоулева тепла и тепловым потерям электромагнитной энергии. Эти принципы используются для достижения эффективного и контролируемого нагрева нефтепровода в процессе индукционного нагрева (Lim, 2021).

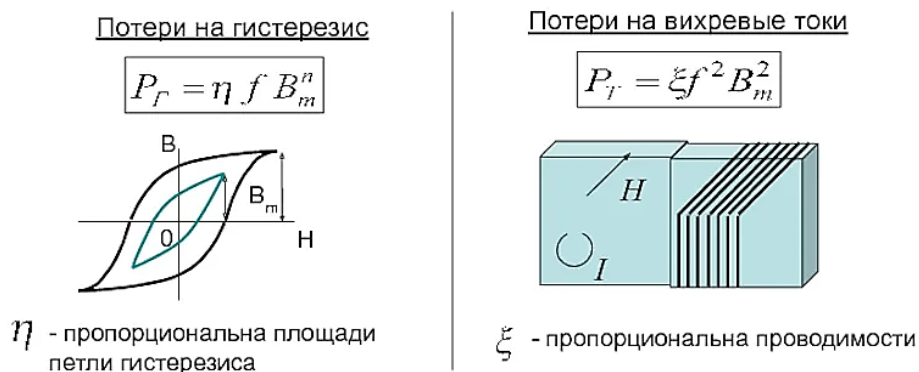


Рисунок 4. Принципы нагрева

Примечание – рисунок заимствован из источника (Lim, 2021)

Преобразователи частоты, предназначенные для индукционного нагрева нефтепроводов, также ориентированы на принципы энергосбережения. Применение регулирования скорости преобразователем частоты позволяет эффективно использовать энергию, способствуя экономии электроэнергии в процессе нагрева. Точно контролируя частоту и выходную мощность, эти преобразователи оптимизируют процесс индукционного нагрева, обеспечивая энергоэффективность и экономичность.

Преобразователи частоты, предназначенные для индукционного нагрева нефтепроводов, работают в определенных диапазонах частот и на определенных уровнях выходной мощности, используя передовые схемы преобразования мощности и принципы работы, позволяющие эффективно и точно контролировать процесс индукционного нагрева. Используя принципы гистерезисных потерь, потерь на вихревые токи и методы энергосбережения, эти преобразователи играют жизненно важную роль в обеспечении энергоэффективного и эффективного обогрева нефтепроводов (Isembergenov, 2021).

В состав основных узлов преобразователя частоты для индукционного нагрева нефтепроводов входят следующие ключевые элементы (Isembergenov, 2021):

1. Источник питания является основным компонентом преобразователя частоты, обеспечивающим необходимую электрическую энергию для процесса индукционного нагрева. Он играет решающую роль в преобразовании стандартного источника переменного тока в высокочастотную мощность переменного тока, что необходимо для эффективного и действенного индукционного нагрева.

2. Схема согласования импеданса является неотъемлемой частью системы индукционного нагревателя, обеспечивая эффективную передачу мощности от источника питания к индукционной катушке. Он предназначен для оптимизации передачи энергии и максимизации эффективности процесса индукционного нагрева.

3. Цепь бака, включающая параллельный набор конденсаторов и катушек индуктивности, является ключевым компонентом системы индукционного нагрева. Он служит резервуаром электростатической и электромагнитной энергии, облегчая преобразование энергии при сильном токе. Такое преобразование энергии при высоком токе через катушку обеспечивает эффективную передачу энергии от индукционной катушки к заготовке, способствуя процессу нагрева.

4. Индукционная катушка, также известная как аппликатор, является жизненно важным компонентом системы. Она отвечает за создание переменного магнитного поля, необходимого для индукции переменного тока в материале, тем самым нагревая заготовку. Конструкция и конфигурация индукционной катушки имеют решающее значение для достижения точного и контролируемого индукционного нагрева.

5. Резонансный преобразователь нагрузки постоянного тока в переменный, приводимый в действие управляемым источником тока от преобразователя постоянного тока в постоянный, необходим для генерации высокочастотной мощности переменного тока, необходимой для индукционного нагрева. Он играет центральную роль в преобразовании мощности постоянного тока в высокочастотную мощность переменного тока, обеспечивая эффективный и действенный обогрев нефтепровода.

6. Конденсатор коррекции коэффициента мощности является важным компонентом цепи нагрузки, работающим совместно с катушкой индукционного нагрева. Это способствует обеспечению точного управления процессом индукционного нагрева, оптимизации коэффициента мощности и повышению общей эффективности системы.

В совокупности эти компоненты составляют основу преобразователя частоты для индукционного нагрева нефтепроводов, обеспечивая эффективное преобразование стандартной мощности переменного тока в высокочастотную мощность переменного тока и точный контроль над процессом индукционного нагрева.

Процесс преобразования частоты индуктора включает в себя расчет величины реактивного сопротивления или проводимости индуктора на заданной частоте. Индуктивное реактивное сопротивление (XL) и индуктивная проводимость (BL) катушки индуктивности можно определить по формуле (1):

$$XL = 2\pi fL \quad (1)$$

где: XL – индуктивное реактивное сопротивление; f – частота напряжения питания; L – индуктивность.

Импеданс индуктора, который является мерой его сопротивления проходящему сигналу, изменяется в зависимости от частоты сигнала. Индукторы имеют более высокий импеданс для сигналов более высокой частоты и более низкий импеданс для сигналов более низкой частоты. Реактивное сопротивление катушки индуктивности прямо пропорционально частоте сигнала и индуктивности. Собственная резонансная частота индуктора – это частота, на которой резонирует его индуктивность с распределенной емкостью, и за пределами этой частоты индуктор не функционирует как индуктор. Процесс выбора дросселя для высокочастотных цепей и модулей включает в себя рассмотрение собственной резонансной частоты и других соответствующих параметров, чтобы обеспечить надлежащую функциональность в желаемом диапазоне частот (Выбор, 2021).

Индуктивный адмиттанс (BL) является обратной величиной индуктивного реактивного сопротивления и рассчитывается по формуле (2):

$$BL = 1/XL \quad (2)$$

где: BL – индуктивный адмиттанс.

Индуктивная проводимость дает представление о способности индуктора проводить переменный ток заданной частоты. При проектировании высокочастотных цепей и модулей важно учитывать собственную резонансную частоту индуктора, поскольку работа за пределами этой частоты может привести к потере функциональности индуктора как индуктора (Induction, 2021).

Таким образом, процесс преобразования частоты индуктора включает понимание индуктивного реактивного сопротивления и проводимости индуктора на заданной частоте, а также рассмотрение поведения индуктора в зависимости от частоты проходящего через него сигнала. Правильный учет собственной резонансной частоты индуктора и других соответствующих параметров имеет решающее значение для обеспечения его функциональности в желаемом диапазоне частот в высокочастотных цепях и модулях.

Влияние преобразователя частоты на индукционный нагрев нефтепровода многогранно и включает в себя различные факторы, которые способствуют эффективности, результативности и практическому применению технологии индукционного нагрева.

Выбор подходящей частоты для индукционного нагрева играет решающую роль в эффективном нагреве электропроводящих материалов, например, используемых в нефтепроводах. Различные частоты используются для конкретных применений в процессе индукционного нагрева. На выбор частоты влияют такие факторы, как размер заготовки, необходимая глубина нагрева и желаемая скорость нагрева. Преобразователь частоты позволяет точно контролировать и регулировать частоту нагрева, тем самым оптимизируя процесс индукционного нагрева в соответствии с конкретными требованиями нагрева нефтепровода (Nikolsky, 2017).

Высокочастотный индукционный нагрев, обычно в диапазоне от 100 кГц до 2 МГц, особенно актуален для применений, требующих быстрого нагрева мелких деталей или глубокого проникновения в более крупные детали. Использование высокочастотного электричества для индукционного нагрева обеспечивает быстрый и эффективный нагрев электропроводящих материалов, а также минимизирует риск загрязнения благодаря отсутствию физического контакта между источником нагрева и заготовкой.

В нефтепроводах преобразователи частоты используются в целях энергосбережения и регулирования расхода. Регулирование скорости преобразователем частоты реализуется как метод оптимизации потока сырой нефти по трубопроводу. Регулируя скорость преобразователя частоты, можно эффективно регулировать поток масла, что способствует экономии энергии и повышению эксплуатационной эффективности.

Технология индукционного нагрева, поддерживаемая преобразователями частоты, становится все более популярной в нефтегазовой промышленности для нагрева трубопроводов с теплоносителем. Эта технология обеспечивает энергоэффективность, снижение эксплуатационных расходов и возможность поддерживать постоянный нагрев теплоносителей, таких как сырая нефть и природный газ. Влияние преобразователей частоты проявляется в использовании магнитно-индукционного нагрева для нагрева трубопроводов, что обеспечивает альтернативу традиционным методам нагрева (Васильев, 2018).

Таким образом, влияние преобразователей частоты на индукционный нагрев нефтепроводов включает в себя выбор оптимальных частот, эффективное применение высокочастотного индукционного нагрева, настройку процессов термообработки, энергосбережение и регулирование расхода, а также внедрение технологии индукционного нагрева трубопроводов теплоносителя. В совокупности эти факторы демонстрируют значительное влияние преобразователей частоты на повышение

эффективности, результативности и практического применения индукционного нагрева в контексте нагрева нефтепроводов.

С учетом изложенного, рассмотрим основные схемы инверторов (рис. 5), которые могут быть использованы для индукционного нагрева, их преимущества и недостатки.

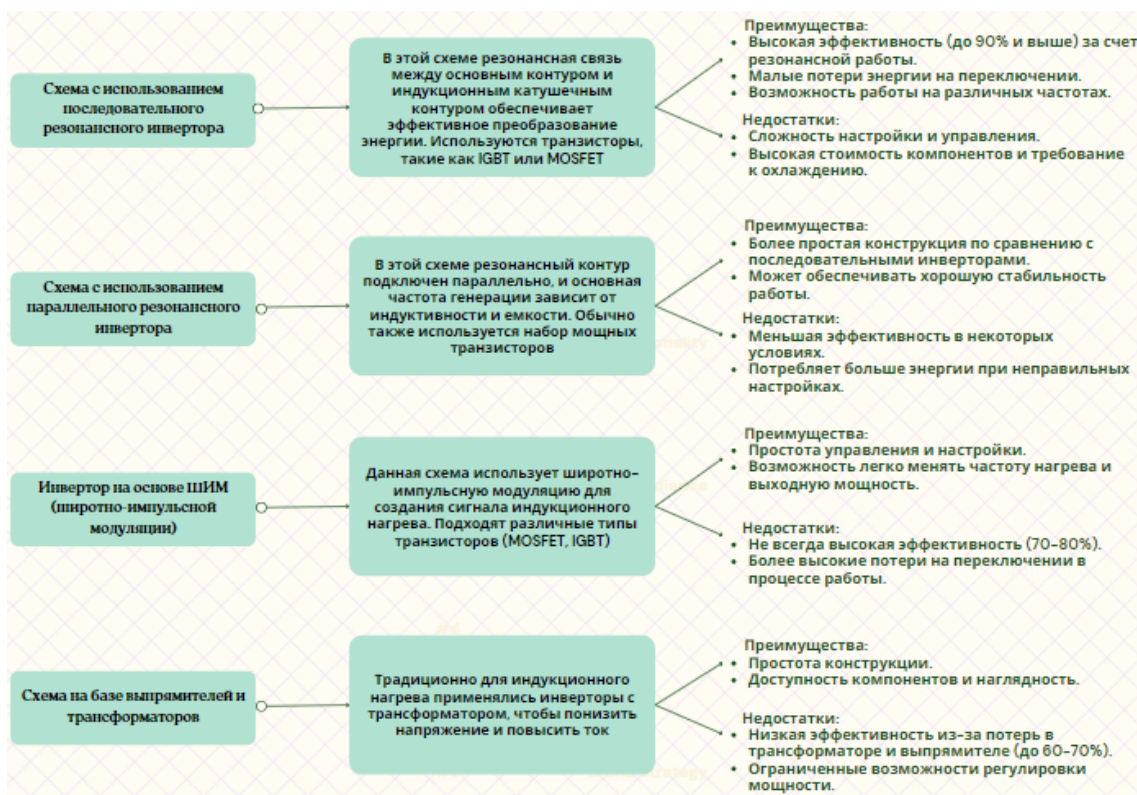


Рисунок 5. Основные схемы инверторов, применяемых при индукционном нагреве

Примечание – составлено автором на основе (Turps, 2024)

На основании представленных схем был выполнен сравнительный анализ, результаты которого приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ схем инверторов

Тип инвертора	Эффективность, (%)	Экономичность	Сложность устройства	Применение
Последовательный резонансный	90-95	Высокая	Высокая	Промышленные приложения, где требуются высокая мощность и скорость нагрева
Параллельный резонансный	80-90	Средняя		Небольшие и средние коммерческие процессы
Инвертор на ШИМ	70-80	Доступная	Средняя	Лабораторные исследования, мелкое производство
Инвертор на базе трансформаторов	60-70	Низкая	Низкая	Общее применение, стыковка с существующими системами

Примечание – составлено автором

Таким образом, выбор схемы инвертора для индукционного нагрева зависит от конкретных требований приложения, доступного бюджета и желаемой эффективности. Последовательные резонансные инверторы являются самыми эффективными, но их стоимость и сложность могут быть проблемой для небольших производств. Параллельные инверторы и схемы на ШИМ предлагают более простые решения с умеренной эффективностью.

Для индукционного обогрева нефтепровода, следуя из представленной выше информации, наиболее подходящими являются последовательные резонансные инверторы. Они обеспечивают высокую эффективность (90-95 %) и подходят для промышленного применения, где требуются высокая мощность и скорость нагрева. Несмотря на то, что они более сложные и дорогие, они обеспечивают наилучшую производительность для крупных промышленных приложений, таких как нагрев нефтепроводов.

В качестве примера рассмотрим расчет параметров представленной схемы, таких как индуктивное реактивное сопротивление и индуктивная проводимость, применяя формулы (1) и (2).

Например, частота $f = 150 \text{ кГц}$ (среднее значение для индукционного нагрева), а индуктивность $L = 100 \text{ мкГн}$ (типичное значение для индукционных катушек).

$$XL = 2 \cdot 3,14 \cdot 150 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 94,250 \text{ м}$$

$$BL = 1/94,25 \approx 0,0106 \text{ см}$$

Таким образом, выбор последовательного резонансного инвертора обусловлен его высокой эффективностью и способностью обеспечивать необходимую мощность для индукционного нагрева нефтепроводов. Расчет параметров схемы, таких как индуктивное реактивное сопротивление и проводимость, позволяет оптимизировать процесс нагрева и обеспечить его эффективность.

Для улучшения эффективности индукционного нагрева нефтепроводов за счет динамической настройки параметров работы преобразователя в реальном времени на основе анализа данных о состоянии системы автором предлагается внедрение адаптивного управления частотой и мощностью преобразователей частоты на основе искусственного интеллекта (ИИ).

Адаптивное управление подразумевает использование алгоритмов машинного обучения для анализа данных, получаемых от датчиков, установленных на нефтепроводах. Эти датчики могут отслеживать температуру, давление, вязкость нефти и другие параметры, влияющие на процесс нагрева. На основе полученных данных ИИ будет в состоянии предсказывать оптимальные настройки частоты и мощности преобразователя частоты.

Преимущества данного внедрения следующие:

– Энергоэффективность – автоматическая настройка параметров позволит существенно сократить энергозатраты, так как система будет работать только в необходимом режиме, избегая избыточного нагрева.

– Повышение надежности – система адаптивного управления сможет предотвращать перегрев и другие потенциальные неисправности, улучшая безопасность эксплуатации.

– Улучшение производительности – быстрая реакция на изменения в условиях эксплуатации позволит поддерживать оптимальную температуру и вязкость нефти, что, в свою очередь, улучшает поток нефти в трубопроводе.

Для реализации данного подхода потребуется установка датчиков, способных собирать данные о состоянии трубопровода, разработка алгоритмов машинного обучения, которые будут анализировать собранные данные и предсказывать оптимальные параметры работы преобразователя, а также интеграция ИИ с существующими системами управления, что позволит обеспечить автоматическую настройку и регулирование работы преобразователей частоты.

Внедрение адаптивного управления частотой и мощностью преобразователей частоты на основе ИИ представляет собой уникальное и перспективное решение для повышения эффективности индукционного нагрева нефтепроводов. Этот подход не только будет способствовать экономии энергии, но и улучшит общую надежность и производительность системы, что делает его актуальным для современных требований нефтяной промышленности.

Заключение. В ходе исследования было установлено, что преобразователи частоты играют ключевую роль в процессе индукционного нагрева нефтепроводов, обеспечивая эффективный и контролируемый процесс нагрева. Основные характеристики преобразователей, такие как входная и выходная частоты, номинальная мощность, КПД, а также методы управления, оказывают значительное влияние на производительность и эффективность системы. Разработанные схемы инверторов и их сравнительный анализ показали, что выбор подходящей схемы инвертора является важным аспектом для достижения оптимального результата в индукционном нагреве.

Внедрение адаптивного управления частотой и мощностью преобразователей частоты на основе искусственного интеллекта (ИИ) открывает новые горизонты для повышения энергоэффективности и надежности системы. Использование алгоритмов машинного обучения для анализа данных о состоянии трубопроводов позволит не только оптимизировать параметры нагрева, но и значительно сократить энергозатраты, предотвращая перегрев и повышая безопасность эксплуатации.

Кроме того, внедрение таких технологий поможет снизить углеродный след нефтяной отрасли, что является важным аспектом в условиях современных экологических требований. Энергоэффективные решения, как адаптивное управление, становятся неотъемлемой частью стратегии устойчивого развития в нефтяной промышленности.

Таким образом, результаты данного исследования подчеркивают важность и необходимость дальнейших исследований и разработок в области применения преобразователей частоты в индукционном нагреве нефтепроводов. Внедрение современных технологий, включая ИИ, в процессы управления преобразователями частоты может значительно повысить эффективность и надежность систем, что имеет критическое значение для устойчивого развития нефтяной отрасли в будущем.

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 использовал gpt-open с целью улучшения читаемости.

Список литературы

- Induction Heating. (2024). <https://www.geeksforgo-eks.org/induction-heating/>
- Isembergenov N.T., Sagyndikova A.Zh., Daskalov P. (2020) Induction metod for heating oil in low production wells. Scientific journal "Bulletin of NAS RK", no.3, 103-110.
- Inverter Circuit (DC To AC Converter) Know How Does It Work. (2024). https://www.academia.edu/20566667/Utility_AC_Frequency_to_High_Frequency_AC_Power_Conversion_Circuit_with_Soft_Switching_PWM_Strategy.

- Lim M., Lee Ch. (2021). Evaluation of Heating Technique of Deformed Reinforcement Using High-Frequency Induction Heating System. *Appl. Sci*, no. 11, 2-32. <https://doi.org/10.3390/app11114947>.
- Nikolsky V., Oliynyk O., Yaris V., Reshetnya K. (2017). Application of electromagnetic fields for intensification of heat and mass exchange in combined gas-liquid processes. *Energy-saving technologies and equipment*, no.3, 33-40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.103868>.
- Shaikh A., Dhayagonde S., Jadhav R., Ohol H. (2023). High frequency converter for induction heating application. *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, Vol. 10, no. 4, 4-10. <https://doi.org/10.17605/OSF.IO/KEB2A>.
- Types of Inverters. (2024). <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-inverters/>
- Understanding the Role of Frequency Converters in Modern Industry. (2024). https://medium.com/@Craber_4482/the-pulse-of-progress-understanding-the-role-of-frequency-converters-in-modern-industry-59ed2e62724e.
- Wang Y., Lucia, O. Zhe Zhang et. al.(2020). A Review of High Frequency Power Converters and Related Technologies. *Journal of the Industrial Electronics Society*. <https://doi.org/10.1109/OJIES.2020.3023691>.
- Валлиулина З., Зинин Ю. (2007). Исследование тиристорных преобразователей частоты для установок индукционного нагрева металлов. *Силовая электроника*. – № 2. https://power-e.ru/wp-content/uploads/2007_02_93.pdf // Valliulina Z., Zin'in Yu. (2007). Issledovanie tiristornykh preobrazovateleychastoty dlya ustanovok induktsionnogonagrevametallov. *Silovayaelektronika*. – № 2. https://power-e.ru/wp-content/uploads/2007_02_93.pdf.
- Васильев И.В. (2018). Совершенствование индукционного нагревательного комплекса для термообработки вязких жидкостей. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Самара, 130. // Vasil'yev I.V. (2018). Sovershenstvovanie induktsionnogo nagrevatel'nogo kompleksa dlya termo obrabotki vyazkikhzhidkostey. *Diss. nasoisk. uch. st. k.t.n. Samara*, 130.
- Выбор силовых дросселей. (2021). <https://www.symmetron.ru/articles/vybor-silovykh-drosseley/> // Vyborsilovykhdrosselyey. (2021). <https://www.symmetron.ru/articles/vybor-silovykh-drosseley/>
- Зинин Ю.К. (2014). Тиристорные преобразователи частоты для индукционного нагрева труб большого диаметра. *Силовая Электроника*. – № 6, 104-111 // Zinin Yu.K. (2014). Tiristornye preobrazovateli chastoty dlya induktsionnogonagreva trub bol'shogodiametra. *Silovaya Elektronika*. – № 6, 104-111.
- Инсепов Д.Г. (2016). Высокочастотный индукционный нагрев нефтепровода. Электрификация транспорта, №12, 103-106 // Insepov D.G. (2016). Vysokochastotnyy induktsionnyy nagrev nefteprovoda. *Elektrifikatsiya transportu*. – №12, 103-106.
- Цыба Ю.А., Кузьмин Ю.В., Даркенбаева Э.Б. (2018). Элементы автоматизированного электропривода. Учебное пособие (для студентов высших учебных заведений специальности «Электроэнергетика») / Цыба Ю.А., Кузьмин Ю.В., Даркенбаева Э.Б. – Алматы: АУЭС, 120. // Tsiba Yu.A., Kuz'min Yu.V., Darkenbaeva E.B. (2018). Elementy avtonomirovannogo elektroprivoda. *Uchebnoe posobie (dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedeniy spetsial'nosti «Elektroenergetika»)* / Tsiba Yu.A., Kuz'min Yu.V., Darkenbaeva E.B. *Almaty: AUES*, 120.

Information about authors

Insepov Dauren Galimzhanovich – PhD student, Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpayev, Almaty, Kazakhstan, E-mail: insepov_dauren83@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7098-4824, +7 707 419 43 75

ГЕОДЕЗИЯ
ГЕОДЕЗИЯ
GEODESY

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_52
MPHTI 36.23.31

В.В. Казанцева¹, Д.С. Ожигин², В.Н. Долгоносков³

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,
г. Караганда, Казахстан

¹E-mail: kazantseva.v@kstu.kz*

²E-mail: ozhigin.dima@kstu.kz

³E-mail: vnd070765@mail.ru

**ПРОЕКТ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ
УСТОЙЧИВОСТИ БОРТОВ КАРЬЕРА ПО ДАННЫМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ
С ПРИМЕНЕНИЕМ БАС**

**ҰҒА ҚОЛДАНА ОТЫРЫП АЭРОФОТОТҮСІРІЛІМ ДЕРЕКТЕРІ
БОЙЫНША КАРЬЕР БОРТТАРЫНЫҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫНЫҢ ЖАЙ КҮЙІН БАҚЫЛАУ
СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ЖОБАСЫ**

**THE PROJECT OF OBSERVATION STATIONS FOR THE STATE OF STABILITY OF THE
SIDES OF THE QUARRY ACCORDING TO AERIAL PHOTOGRAPHY USING UAS**

Аннотация. Данная статья представляет исследование и разработку системы наблюдательных станций, предназначенных для мониторинга состояния устойчивости бортов карьера в горнодобывающей промышленности. Методика геодезического мониторинга основана на использовании беспилотных авиационных систем (БАС) и аэрофотосъемки для сбора данных и анализа состояния карьера. В статье подробно описываются этапы разработки и внедрения данной методики, включая выбор аппаратуры, разработку программного обеспечения, маршрутизацию полетов, обработку данных, визуализацию результатов и меры по обеспечению безопасности. Целью данной работы является повышение безопасности и устойчивости в горнодобывающей индустрии, а также содействие экологической устойчивости природной среды.

Ключевые слова: карьер, борт, аэрофотосъемка, наблюдательная станция, деформация.

Аңдатпа. Бұл мақала тау-кен өнеркәсібіндегі Карьер борттарының тұрақтылығының жай-күйін бақылауға арналған бақылау станциялары жүйесін зерттеу мен өзірлеуді ұсынады. Геодезиялық мониторинг әдістемесі мәліметтерді жинау және карьер жағдайды талдау үшін ұшқышсыз ұшу жүйелерін (ҰҰЖ) және аэрофототүсірілімдерді пайдалануға негізделген. Мақалада аппаратураны таңдау, бағдарламалық қамтамасыз етуді өзірлеу, ұшуды бағыттау, деректерді өңдеу, Нәтижелерді визуализациялау және қауіпсіздікті қамтамасыз ету шараларын қоса алғанда, осы әдісті өзірлеу және енгізу кезеңдері егжей-тегжейлі сипатталған. Бұл жұмыстың мақсаты тау-кен өнеркәсібіндегі қауіпсіздік пен тұрақтылықты арттыру, сондай-ақ табиғи ортаның экологиялық тұрақтылығына жәрдемдесу болып табылады.

Түйін сөздер: карьер, борт, аэрофототүсірілім, бақылау станциясы, деформация.

Abstract. This article presents the research and development of a system of observation stations designed to monitor the stability of the sides of a quarry in the mining industry. The geodetic monitoring methodology is based on the use of unmanned aircraft systems (UAVs) and aerial photography to collect data and analyze the state of the quarry. The article describes in detail the stages of development and implementation of this methodology, including the selection of equipment, software development, flight routing, data processing, visualization of results and security measures. The purpose of this work is to increase safety and sustainability in the mining industry, as well as to promote environmental sustainability of the natural environment.

Keywords: quarry, board, aerial photography, observation station, deformation.

Введение. Горнодобывающая отрасль занимает ключевую позицию в мировой экономике, обеспечивая сырьем такие важные сферы, как строительство, энергетика и промышленность. Однако обеспечение безопасной и устойчивой работы карьеров требует постоянного контроля их состояния, особенно устойчивости бортов. Нарушения в устойчивости могут привести к авариям, экономическим потерям и экологическим проблемам.

Предлагается усовершенствовать методику маркшейдерско-геодезического мониторинга за состоянием устойчивости горного массива (Калашник А.И., Максимов Д.А., 2022) с использованием аэрофотосъемки при создании проекта наблюдательных станций на угольном разрезе «Шерубай Комир», участок отработки пласта К₂ и К₃, расположенный на Центральном участке Черубайнуринского угленосного района Карагандинского угольного бассейна. По административному делению он относится к г. Абаю Карагандинской области (рис. 1). Использование беспилотных авиационных систем (БАС) может позволить эффективно обнаружить и проанализировать нарушения устойчивости откосов разреза, что будет способствовать повышению безопасности работников и стабильности горнодобывающей деятельности, соблюдению экологических стандартов и оптимизации операций на разрезе.



Рисунок 1. Схема расположения участка отработки пласта К₂ и К₃

Примечание – составлено автором

Целью данного проекта является создание системы наблюдательных станций для мониторинга устойчивости горных массивов на основе данных аэрофотосъемки.

Использование современных технологий, таких как GNSS-платы и специализированное программное обеспечение, позволяет создавать высокоточные цифровые модели местности, способствуя более эффективному управлению горнодобывающими объектами.

Данное исследование направлено на повышение безопасности, устойчивости и эффективности деятельности в горнодобывающей индустрии и содействие соблюдению экологических норм и стандартов.

Литературный обзор. Геопространственный мониторинг бортов карьеров и отвалов является важной задачей, регламентированной рядом нормативно-правовых документов. Для выполнения маркшейдерско-геодезического контроля устойчивости откосов карьеров создается сеть наблюдательных станций, представленных профильными реперами.

Выбор мест для закладки реперов осуществляется с учетом инженерно-геологических условий месторождения, текущего состояния и перспектив развития горных работ. При этом учитываются следующие косвенные признаки возможных деформаций:

а) наличие слабых пластичных, обводненных или сильно трещиноватых пород, формирующих борт или уступ;

б) вероятность подрезки слабых контактов, тектонических нарушений и обводненных пород, наклоненных в сторону выработанного пространства;

в) несоответствие фактических параметров уступов и отвалов проектным данным;

г) нарушения технологии проведения массовых взрывов;

д) присутствие на откосах карьера непредусмотренных проектом отвалов пород и тяжелого горнотранспортного оборудования (М. Belova, E. Iakovleva, 2019; А. Панжин, Б. Мазуров, 2021).

Традиционные методы выбора мест для закладки реперов наблюдательных станций требуют значительных временных затрат – от нескольких дней до нескольких месяцев, в зависимости от размеров карьера, геомеханической обстановки и доступности участков. Применение аэрофотосъемки с использованием беспилотных авиационных систем значительно ускоряет этот процесс, позволяя оперативно определить оптимальные места для установки станций и сократить общее время работы (А. Павлович, А. Шепель, 2020).

Материалы и методы исследования. Для анализа нарушений устойчивости откосов угольного разреза «Шерубай Комир» использовался БАС с вертикальным взлетом DJI Mavic 2 Pro PPK, оснащенный GNSS-платой. Установленная GNSS-плата представляет собой компактный спутниковый приемник, обеспечивающий определение положения дрона в момент съемки с сантиметровой точностью. Она поддерживает работу с несколькими спутниковыми системами и частотами (рис. 2).



Рисунок 2. Геодезический апгрейд от компании TOPODRONE

Примечание – составлено автором

Процесс выполнения аэрофотосъемки с использованием БАС был разделен на три этапа: подготовительный, полевой и камеральный.

Подготовительный этап включает в себя: создание полетной миссии с помощью программного обеспечения DJI GS Pro; проектирование расположения опорных маркеров (рис. 3) и подготовку необходимого геодезического оборудования. На общей площади объекта было запланировано равномерное размещение 10 опорных маркеров, что позволило повысить точность привязки моделей по всему периметру территории.



Рисунок 3. Тайловая модель угольного разреза

Примечание – составлено автором

Полевой этап. На объекте было выбрано место для установки базовой станции на отметке +487,0 м. Станция выполняла сессию измерений в статическом режиме в течение 17 часов. Полученные данные были обработаны с использованием точных эфемерид, предоставленных сервером канадской компании «Natural Resources Canada».

В режиме PPP (Precise Point Positioning) координаты базовой станции определялись на основе GNSS-наблюдений и дополнительной информации, включая эфемериды спутников, коррекции и параметры атмосферы (Xiangdong An, Ralf Ziebold, 2023). Полученные координаты в системе WGS-84 имеют точность порядка 1 см:

- широта: точность 0.0029 м;
- долгота: точность 0.0026 м;
- высота: точность 0.0103 м.

Следующим этапом выполнялась выноска в натуру опорных маркеров с использованием GNSS-технологий. Для маркировки на аэрофотоснимках предпочтительно использовать белые материалы, если фон окружающего ландшафта темный, зеленый или серый. При светлом фоне следует выбирать черные материалы. Размеры маркировочных знаков подбираются так, чтобы их изображения на фотографиях были не менее 0,10 мм, с учетом масштаба съемки. Это обеспечивает четкое различение маркеров на фотографиях и ускоряет обработку данных при создании цифровой модели местности. Все маркеры устанавливаются и координируются с помощью GNSS-оборудования с погрешностью 10-15 мм (Будникова П., Алпатов А., 2019).

После подготовки наземного обоснования начинается подготовка дрона для выполнения полета по запланированной миссии. Для безопасной работы дрона выбирается и обустраивается площадка для взлета. Она должна быть жесткой и

располагаться на открытой местности: в радиусе 15 метров не должно быть объектов. Калибровка компаса проводится в определенной последовательности, указанной в источнике (Sebastián Granados-Bolaños, 2021). После выполнения полетной миссии дрон возвращается на место посадки, после чего начинается этап камеральной обработки.

Камеральный этап включает в себя обработку полевых измерений в специализированных программных средствах:

1. Уравнивание маршрута дрона по технологии РПК (Nakata, Yasutaka, Iwasaki, Kenta, 2023): перед созданием плотного облака и ЦММ необходимо выполнить постобработку GNSS-данных, которая выполняется согласно определенному алгоритму, указанному в руководстве пользователя (TOPODRONE, 2020), и геотегинг изображений в ПО TOPOSETTER 2.0. В результате обработки данных полета на угольном разрезе можно прийти к выводу, что и траектория движения дрона, и момент срабатывания затвора имеют фиксированные решения от 0 мм до 10 мм.

2. Создание цифровой модели местности в ПО Agisoft Metashape включает (Steffi Vassallo, 2024) в себя несколько этапов: импорт фотографий, выравнивание, построение 3D-модели, текстурирование и генерацию цифровой модели местности. Выравнивание фотографий представляет собой ключевой этап обработки данных аэрофотосъемки. Этот процесс выполняется исключительно на основе исходных изображений, без изменения их размеров или геометрии. Плотное облако точек формируется путем расчета карт глубины для каждого изображения. Оно служит исходным материалом для построения трехмерной модели, в то время как текстуры тайлов создаются непосредственно из исходных фотографий. В результате проведенных расчетов была построена тайловая модель угольного разреза (Д. Кириков, В. Федоров и др., 2023) «Шерубай Комир» с высоким качеством детализации и разрешением 5,8 см/пиксель (рис. 3).

3. Геодезическая привязка модели по координатам опорных маркеров. При определении местоположения маркеров в трехмерном пространстве важно выровнять их положение, перемещая указатель (флажок) к центру маркера (рис. 4) как минимум на двух изображениях. Если доступно большее количество снимков с этим маркером, то рекомендуется указать его местоположение на всех доступных изображениях. Использование большего количества фотографий для определения проекций маркера повышает точность позиционирования.

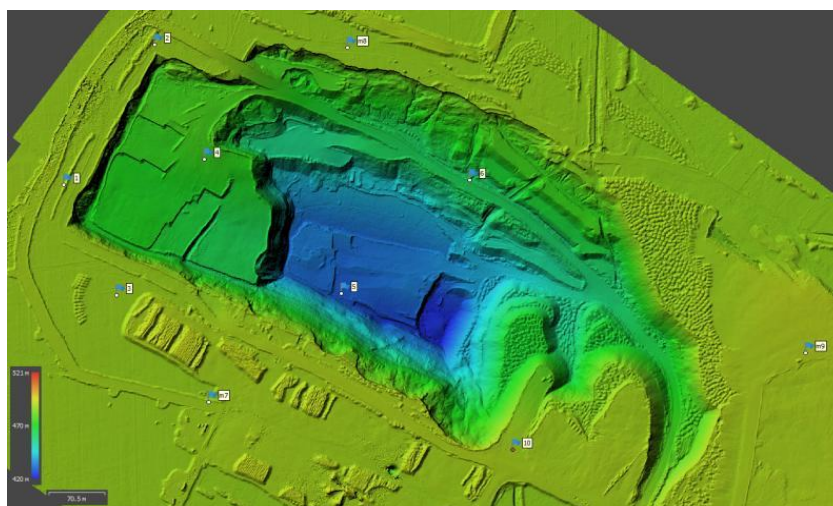


Рисунок 4. Месторасположение опорных маркеров на ЦММ

Примечание – составлено автором

В результате обработки полученных данных аэрофотосъемки при помощи БАС DJI Mavic 2 Pro PPK была получена цифровая модель местности, являющаяся источником необходимой информации в краткие сроки.

Результаты и их обсуждения. Детальное обследование бортов разреза с использованием цифровой модели выявило два участка, подверженных деформациям прибортового массива (рис. 5).

На северном борту разреза зафиксированы нарушения устойчивости, связанные с деформациями группы уступов в зоне выходов угольных пластов под наносы.

На южном борту отмечены аналогичные проблемы, вызванные деформациями группы уступов на горизонте +490 м.

Участок 1 (рис. 5, а): на данном участке сдвигению горного массива подверглась группа уступов между горизонтами +490 и +451 м, протяженностью по фронту 164 м (рис. 6).

Участок 2 (рис. 5, б): этот участок расположен между горизонтами +487 и +465 м. Протяженность фронта деформации составляет 173 м (рис. 7).

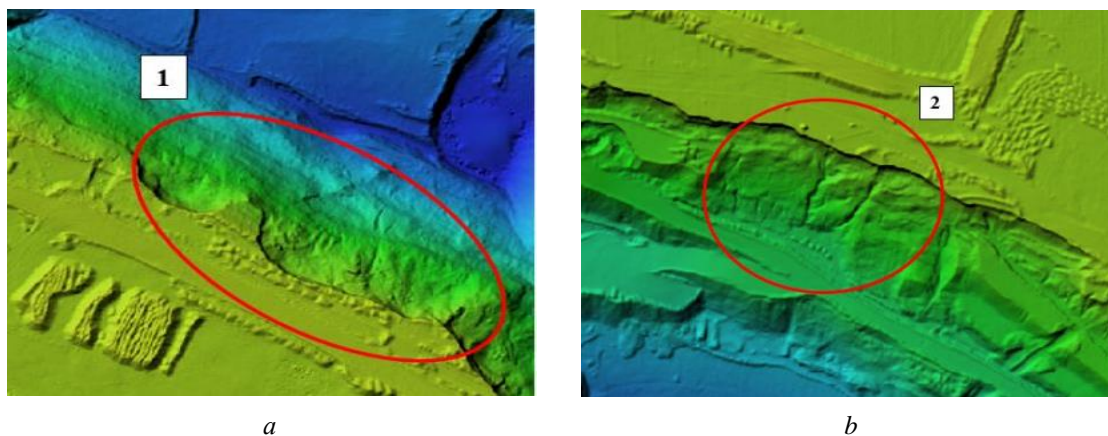


Рисунок 5: а – участок деформирования на южном борту; б – участок деформирования на северном борту

Примечание – составлено автором



Рисунок 6. Линейные параметры южного борта разреза

Примечание – составлено автором



Рисунок 7. Линейные параметры северного борта разреза

Примечание – составлено автором

Для полного и объективного анализа механизма деформаций откосов уступов на разрезе и разработки противодеформационных мероприятий рекомендуется организовать наблюдательные станции в проблемных зонах. Эти станции позволят осуществлять мониторинг состояния устойчивости откосов уступов и бортов разреза (Дорохов Д., 2018).

На угольном разрезе «Шерубай Комир», расположенном на участке отработки пластов K_2 и K_3 Центрального участка Черубайнуринского угленосного района Карагандинского угольного бассейна, в местах наиболее вероятного возникновения деформаций (участки 1 и 2) рекомендуется заложить две наблюдательные станции (рис. 8):

- на южном борту разреза, на горизонте +490 м, в районе участка 1, где наблюдаются деформации группы уступов;
- на северном борту разреза, на горизонте +487 м, в районе участка 2, где зафиксированы деформации группы уступов в зоне выходов угольных пластов под наносы.

Размещение наблюдательных станций в указанных зонах, где проявились процессы деформации карьерных откосов и существует наибольший риск возникновения новых деформаций, позволит провести комплексные геомеханические исследования и повысить эффективность мониторинга (Низаметдинов Ф.К., 2020).

Перенос проекта наблюдательных станций в натуре осуществляется путем построения на местности необходимых углов и длин. Разбивка реперов профильных линий выполняется инструментально с использованием электронного тахеометра.

Процедура закладки реперов в горнодобывающем разрезе предусматривает, что каждая профильная линия должна включать 2-3 опорных репера и серию рабочих реперов. Количество рабочих реперов определяется такими факторами, как глубина разреза, а также горно-геологические и гидрогеологические условия.

В пределах зоны возможных обрушений расстояние между рабочими реперами должно составлять 10 метров. По мере удаления от этой зоны расстояние может увеличиваться до 20-30 метров. Между опорными реперами расстояние должно составлять от 40 до 50 метров. На каждой площадке (берме), уступе или ярусе отвала

рекомендуется устанавливать не менее двух реперов: один вблизи верхнего края уступа и другой ближе к нижней части верхнего уступа. Расстояние между рабочими реперами на уступах определяется шириной бермы.



Рисунок 8. Район расположения наблюдательных станций I и II

Примечание – составлено автором

Опорные реперы должны располагаться за пределами зоны деформаций, на верхней площадке разреза или у основания отвала. Длина одной профильной линии по поверхности земли от крайнего опорного репера до верхней бровки откоса борта разреза должна составлять 1,5 ширины разреза (обозначается как 1,5 Н) (Ситникова Е., Ожигин С., 2019).

Заключение. Использование современных технологий, включая беспилотные авиационные системы с GNSS-платой, предоставляет возможность эффективно анализировать и контролировать устойчивость откосов в горнодобывающей промышленности (Литвиненко Н.В., Маврин И.Д., 2024). В данной работе были успешно выполнены все этапы проведения аэрофотосъемки и создания цифровой модели местности для угольного разреза «Шерубай Комир». Результаты анализа позволили выявить участки с нарушениями устойчивости, что является важной информацией для дальнейших мероприятий по обеспечению безопасности и стабильности горных работ. Рекомендуется провести наблюдательные станции для геомеханических исследований в областях, где выявлены деформации и наибольший риск новых нарушений устойчивости откосов. Это поможет принимать своевременные меры для предотвращения потенциальных аварийных ситуаций и обеспечения безопасности работы в угольном разрезе.

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 авторы не использовали генеративный ИИ.

Список литературы

- Kalashnik A.I., D.A. Maksimov, N.A. Kalashnik, A.Yu. Dyakov. Multilevel complex studies and monitoring of tailings storage facilities of mining enterprises in the northwestern part of the Russian sector of the Arctic. Monograph, published by the Kola Science Center, Apatity, 2022. DOI: 10.37614/978.5.91137.465.5.
- Margarita Belova, Emilia Iakovleva, Anton Popov. Mining and Environmental Monitoring at Open-Pit Mineral Deposits. Journal of Ecological Engineering. – 2019. – Vol. 20. – P. 172-178, DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/105438>.

- Nakata, Yasutaka, Iwasaki, Kenta, Shimoda, Seiji. Understanding microtopography changes in agricultural landscapes through precision assessments of digital surface models by the UAV-RTK-PPK method without ground control points. *Smart Agricultural Technology*. – 2023. – Т. 5. – № 100269.
- Pavlovich A., Shepel A. Implementation of unmanned aerial vehicles for the prompt solution of scientific and production problems in the conditions of the Mikhailovsky Mining and Processing Plant named after A.V. Varichev. *Journal "Mining Industry" No. 3 / 2020*, p. 26. DOI: <http://dx.doi.org/10.30686/1609-9192-2020-3-26-30>.
- Sebastián Granados-Bolaños, Adolfo Quesada-Román, Guillermo E. Alvarado. Low-cost UAV applications in dynamic tropical volcanic landforms. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. – 2021. – 7 p.
- Steffi Vassallo. Instructions manual for creating 3D models in Agisoft Metashape: Professional Edition. *Lisbon User Manual*, 2024. DOI:10.5281/zenodo.13870098.
- TOPODRONE DJI Mavic Mini PPK – the most affordable tool for cadastral and topographic surveying // Geodetic unmanned aerial vehicles. 2020 [Electronic resource]: <https://geodesist.ru/threads/statja-topodrone-dji-mavic-mini-ppk-samyj-dostupnyj-instrument-dlja-kadastra-i-toposemki.84724/>
- Xiangdong An, Ralf Ziebold, Christoph Lass. From RTK to PPP-RTK: towards real-time kinematic precise point positioning to support autonomous driving of inland waterway vessels. *GPS Solutions*. – 2023. 27:26.
- Будников П.А., Алпатов В.В., Васильев А.Е., Обзор современного состояния методов высокоточной навигации по ГНСС и их перспективы развития на территории РФ. Гелиогеофизические исследования. – № 23, 16-22, 2019 // Budnikov P.A., Alpatov V.V., Vasiliev A.E., Review of the current state of high-precision GNSS navigation methods and their development prospects in the Russian Federation. *Heliogeophysical research*. – № 23, 16-22, 2019.
- Дорохов Д.В., Низаметдинов Ф.К., Ожигин С.Г. Методика исследования деформаций поверхности грунта в шахтном поле. *Журнал горного дела*. – 2018. – Т. 54. – № 5 // Dorokhov D.V., Nizametdinov F.K., Ozhigin S.G. A Technique for Surveying of Ground Surface Deformations in Mine Field. *Journal of Mining Science*. – 2018. – Т. 54. – № 5.
- Кириков Д.А., Федоров В.С., Калимуллина Д.И., Охунов Ш.Р. Анализ данных аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов для изучения состояния бортов угольного разреза // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, 2023. – Выпуск 2. – С. 236-248 // D.A. Kirikov, V.S. Fedorov, D.I. Kalimullina, Sh.R. Okhunov. Analysis of aerial photography data from unmanned aerial vehicles to study the state of the sides of a coal mine // *Izvestiya Tula State University. Earth Sciences*, 2023, issue 2, pp. 236-248.
- Литвиненко Н.В., Маврин И.Д., Идрисов А.Ф. О выборе методики детальной съемки бортов карьеров при помощи БПЛА для оценки их трещиноватости // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2024. – Т. 15. – № 1 // Litvinenko N.V., Mavrin I.D., Idrisov A.F. On the choice of a method for detailed survey of quarry sides using UAVs to assess their fracturing // *Actual problems of modern science, technology and education*. 2024. – V. – 15. – No. 1.
- Низаметдинов Ф.К., Мустафин М.Г., Ожигин С.Г. Геомониторинг состояния устойчивости карьерных откосов. *Журнал ИнтерЭкспо ГЕОСИБИРЬ*. – 2020. – Т. 1. – № 1. – С. 176-185 // Nizametdinov F.K., Mustafin M.G., Ozhigin S.G. Geomonitoring of the state of stability of quarry slopes. *InterExpo GEOSIBIR Magazine*. – 2020. – Vol. 1. – No. 1. – P. 176-185.
- Панжин А.А., Мазуров Б.Т., Панжина Н.А. Геодинамический мониторинг и моделирование поля деформаций на Коркинском угольном месторождении. *Известия ТулГУ. Науки о Земле*, 2021. – Выпуск 2. – С. 94-106 // A.A. Panzhin, B.T. Mazurov, N.A. Panzhina. Geodynamic Monitoring and Modeling of the Deformation Field at the Korkinskoye Coal Deposit // *Bulletin of Tula State University. Earth Sciences*, 2021. – Issue 2. – P. 94-106.
- Ситникова Е.В., Ожигин С.Г., Кулыгин Д.А. Анализ деформаций прибортовых массивов на разрезе «Каракомир» и разработка проекта наблюдательных станций для мониторинга их состояния. *ИнтерЭкспо ГЕОСИБИРЬ*. – 2019. – Т. 1. – № 1 // Sitnikova E.V., Ozhigin S.G., Kulygin D.A. Analysis of deformations of near-edge massifs at the Karakomir section and development of a design for observation stations to monitor their condition. *InterExpo GEOSIBERIA*. – 2019. – Т. 1. – No. 1.

Information about authors

Kazantseva Victoria – Master of Technical Sciences Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan, kazantseva.v@kstu.kz

Ozhigin Dmitry – PhD, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan, ozhigin.dima@kstu.kz

Dolgonosov Viktor – Doctor of Technical Sciences, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan, vnd070765@mail.ru

ТАУ-КЕН ІСІ
ГОРНОЕ ДЕЛО
MINING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_61
MFTAA 52.13.15

А.К. Кожас¹, Д.К. Таханов², М. Рабатұлы², Г.К. Сапинов³, А.Т. Желдикбаева²

¹Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан
E-mail: kozhas@bk.ru

²«Әбілқас Сағынов атындағы техникалық университеті» акционерлік қоғамы,
Қарағанды Қ., Қазақстан
E-mail: Takhanov80@mail.ru

E-mail: mukhammedrakhym@mail.ru*
E-mail: aisaule89@mail.ru

³Назарбаев Университетінің Тау-кен және жер туралы ғылымдар мектебі,
Астана қ., Қазақстан
E-mail: gsapinov@mail.ru

КӨЛДЕНЕҢ КЕН ҚАБАТТАРЫН ИГЕРУ КЕЗІНДЕ ЖЕР БЕТІНІҢ ШӨГУІН БОЛЖАУ ӘДІСТЕРІН ЖЕТІЛДІРУ

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

IMPROVEMENT OF PREDICTIVE METHODS FOR CALCULATING SURFACE SUBSIDENCE DURING THE DEVELOPMENT OF HORIZONTAL ORE DEPOSITS

Аңдатпа. Бір типті және қабаттасатын тау жыныстары жағдайында қазу кезінде бүйірлік беттердің қысылуының деформациясын ескере отырып, өндірілген кеңістіктің үстінен жер бетінің шөгуін анықтау тәсілі ұсынылды. Шөгу жер бетіне шыққан кезде жылжу мұльдасының болжамды профилін құру мәселелері қаралды. Зерттеудің мақсаты-тазарту өндірісінің бүйір беттерінің қысылу деформацияларын ескере отырып, жер бетінің шөгуін анықтау. Жұмыста жер асты тазарту жұмыстарының жер бетінің жай-күйіне әсерін болжауға мүмкіндік беретін жылжу параметрлерін анықтау әдісі ұсынылған, ол жұмсақ кенді денелерді қазу кезінде целликтердің абсолютті деформацияларының әсер ету дәрежесін, тау жыныстары мен тазарту кеңістігінің бүйір аймақтарының жер бетінің шөгу мөлшеріне әсер ету коэффициентін ескереді. Тау жыныстары мен жер бетінің жылжуын есептеудің ұсынылған болжамды әдісі тау жыныстары массивінде сырғанау сызықтарының қисықтарын құруға негізделген. Табиғи тепе-теңдік қоймасын жасау арқылы жер асты тау-кен жұмыстарының жер бетіне әсер ету дәрежесі белгіленеді. Құлау күмбезі немесе табиғи тепе-теңдік күмбезінің және жылжымалы мұльда аймақтарының (тегіс деформация аймақтары, қауіпті жылжу және құлау аймақтары, құлаудың пайда болу аймақтары) шекаралары үш отбасының сырғанау беттерінің көмегімен белгіленеді. Сырғанау сызықтарының қисықтары тау жыныстарының әр литологиялық типі үшін жеке есептелген және салынған тау жыныстарының беріктік паспорттарына негізделген.

Түйін сөздер: Сырғанау сызықтары, жер бетінің шөгуі, жылжу мұльдасы, бүйір беттерін қысу, беріктік паспорты, тау жыныстары, қабаттар, деформация.

Аннотация. Предложен подход к определению оседания земной поверхности над выработанным пространством с учетом деформации сжатия боковых граней при разработке в условиях однотипных и переслаивающихся горных пород. Рассмотрены вопросы построения прогнозного профиля мұльды сдвига при выходе оседания на поверхность. Цель исследования – определение оседания земной поверхности с учетом деформаций сжатия боковых граней очистной выработки. В работе предложен метод определения параметров сдвига, позволяющий прогнозировать влияние подземных очистных работ на состояние земной поверхности при разработке пологих рудных тел, учитывающий степени влияния абсолютных деформаций целиков, коэффициента разрыхления горных пород и боковых зон

очистного пространства на величину оседания земной поверхности. Предлагаемый прогнозный метод расчета сдвига горных пород и земной поверхности основан на построении кривых линий скольжения в массиве горных пород. Построением над выработкой свода естественного равновесия фиксируется степень влияния подземных горных разработок на поверхность земли. Границы свода обрушения или свода естественного равновесия и зон мульды сдвига (зоны плавных деформаций, зоны опасных сдвигов и обрушений, зоны образования провала) устанавливаются с помощью поверхностей скольжения трех семейств. Кривые линий скольжения строятся на основе паспортов прочности горных пород, рассчитанных и построенных для каждого литологического типа пород в отдельности.

Ключевые слова: Линии скольжения, оседание земной поверхности, мульда сдвига, сжатие боковых граней, паспорт прочности, породы, слоистость, деформация.

Abstract. An approach is proposed to determine the subsidence of the Earth's surface over the developed space, taking into account the compression deformation of the lateral faces during development under conditions of the same type and overlapping rocks. The issues of constructing a predictive profile of the mulda of displacement at the exit of subsidence to the surface are considered. The purpose of the study is to determine the subsidence of the Earth's surface, taking into account the compression deformations of the lateral faces of the treatment work. The paper proposes a method for determining the parameters of displacement, which makes it possible to predict the impact of underground cleaning operations on the state of the earth's surface during the development of shallow ore bodies, taking into account the degree of influence of absolute deformations of the pillars, the coefficient of loosening of rocks and lateral zones of the cleaning space on the amount of subsidence of the Earth's surface. The proposed predictive method for calculating the displacement of rocks and the Earth's surface is based on the construction of sliding curves in the rock mass. The degree of influence of underground mining on the surface of the earth is fixed by the construction of the arch of natural equilibrium over the development. The boundaries of the collapse vault or the vault of natural equilibrium and the zones of mulda displacement (zones of smooth deformations, zones of dangerous shifts and collapses, zones of failure formation) are established using sliding surfaces of three families. The curves of the sliding lines are constructed on the basis of rock strength certificates calculated and constructed for each lithological type of rocks separately.

Keywords: Sliding lines, subsidence of the Earth's surface, mulda of displacement, compression of lateral faces, strength passport, rocks, layering, deformation.

Kіpіcne. Жер қойнауындағы пайдалы қазбаларды қазу кезінде массив қозғала бастайтын бос орындар пайда болады. Қозғалыстар жер бетіне жетіп, онда орналасқан ғимараттар мен құрылыстарды деформация мен құлау қаупіне ұшыратуы мүмкін. Үстіңгі қабаттардың ығысуының салдарларының қауіптілік дәрежесін бағалау үшін тау-кен жұмыстарына байланысты негізгі жыныстардың құлау заңдылықтарын және жер бетінің шөгуін уақтылы анықтау қажет (Vyazmensky A., Elmo D., & Stead D 2010).

Тау жыныстарының қозғалысы тектоникалық процестер, шаймалау, жер асты сулары деңгейінің төмендеуі, сондай-ақ ылғал немесе сусыздану нәтижесінде тау жыныстарының механикалық қасиеттерінің өзгеруі және басқа да осыған ұқсас себептер сияқты әртүрлі факторлардың әсерінен мүмкін болады.

Тау жыныстары мен жер бетінің ығысуы тау-кен жұмыстарынан немесе әртүрлі табиғи процестерден туындаған теңгерімсіздік нәтижесінде осы тау жыныстарының ығысуы мен деформациясын білдіреді.

Тау-кен жұмыстарымен өзгертілген тау жыныстарының массасынан тау жыныстарының орын ауыстыру ауданы әдетте орын ауыстыру ауданы деп аталады, ал жер бетінің онымен байланысты бөлігі орын ауыстыру аймағы деп аталады.

Қазіргі уақытта жердегі нақты уақыттағы бақылаулар арқылы алынған ақпараттық деректер жер асты тау-кен жұмыстарының нәтижесінде пайда болатын жер бетінің қозғалысы мен деформациясын болжау үшін пайдаланылады.

Объектілерде жұмыс істеу процесін ұзақ зерттегеннен кейін белгілі бір жағдайларда олардың қауіпсіз және тиімді жұмыс істеуі мүмкін екендігі анықталды. Негізгі шарттар-терең игеру, пайдалы қазбаларды өндірудің арнайы әзірленген және ұтымды әдістерін

қолдану, сондай-ақ арнайы жобалау шаралары мен басқа да техникалық шешімдерді қолдана отырып объектілерді алдын ала дайындау.

Сипатталған мәселелердің сапалы және ғылыми шешімі тау жыныстары мен жердің қозғалу процесіндегі заңдылықтарды терең түсінуді талап етеді. Бұл процестің көріністерін мұқият зерделеу, жер бетінде де, әртүрлі құрылымдарда да орын ауыстырулар мен деформацияларды есептеу әдістерін меңгеру қажет. Сондай-ақ пайдалы қазбалардың жоғалуын барынша азайту үшін қолайсыз жағдайларда көшкінге қарсы тиімді және оңтайлы шараларды қолдануды үйрену маңызды.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Тау жыныстарының қозғалысын зерттеу үшін әдетте көптеген тірек нүктелерінен тұратын бақылау станцияларын төсеудің аспаптық әдісі қолданылады. Тірек нүктелерінің өлшенген орын ауыстыруларын түсіндіре отырып, үстіңгі қабаттың қалыңдығының орын ауыстыру заңдылықтары анықталады. Тау жыныстарының қозғалу процесін түсіну үшін бұл әдіс сенімді материал алуға мүмкіндік береді, бірақ ұзақ уақытты қажет етеді.

Тау жыныстарының массалық қозғалысы саласында теориялық зерттеулер мен математикалық ұқсастықтар негізінде көптеген эмпирикалық және теориялық есептеу әдістері, сондай-ақ жартылай эмпирикалық әдістер алынды, олардың сандық коэффициенттері далалық бақылаулар негізінде анықталады (Орлов Г.В., 2010; Орлов Г. В., 2000). Деформацияны зерттеу әдістерін талдау және тау жыныстарының қозғалысын болжау кезінде көптеген параметрлер ескеріледі. (Абдибаитов Ш.А., 2018) жұмыста жер бетінің шөгуіне әсер ететін параметрлер үш топқа бөлінеді:

– бұрыштық (шекаралық бұрыштар, орын ауыстыру бұрыштары, жыртылу, құлау, шұңқырдың пайда болуы);

– тау жыныстары мен жер бетінің деформациясы мен ығысуы (шөгу, еңіс, қисықтық, көлденең ығысулар);

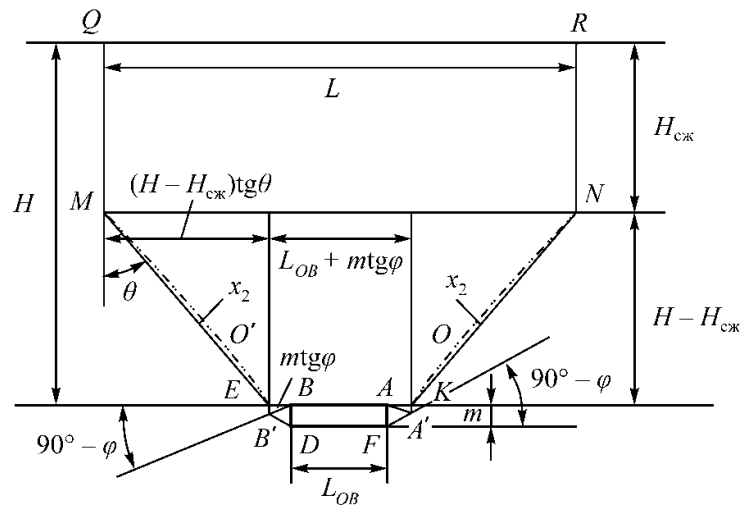
– уақытша (қозғалыс ұзақтығы).

(Sahu P., Pradhan M. & Lokhande R.D. 2021) жұмыста жер бетіндегі шұңқырлардың пайда болуына әсер ететін геотехникалық параметрлер (тау-кен тереңдігі, кенжар биіктігі, тау жыныстарының топырақ көлеміне қатынасы, үстіңгі жыныстың сығылу және созылу беріктігі, үстіңгі жыныстың салмақ тығыздығы және ағын коэффициенті) зерттелді және олардың регрессиялық талдауы жүргізілді. Талдау көрсеткендей, механикалық параметрлер геометриялық параметрлермен салыстырғанда шұңқырдың тереңдігіне көбірек әсер етеді.

Жер бетінің максималды шөгінділерін есептеу дәлдігін арттыру үшін (Аверин Г.А., Доценко О.Г. & Корецкая Е.Г. 2021) массивтегі күшті тау жыныстарының пайызы және өндірілген кеңістіктің енінің D қазу тереңдігіне H қатынасы ескерілді, тиісті түзету коэффициенті енгізілді $K = a(b/H)^b$, мұндағы a , b – қазымдалатын массивтегі қатты жыныстардың үлесіне байланысты параметрлер.

Бұл жұмыстың мақсаты – тазартпа қазбасының бүйір беттерін сығу деформацияларын ескере отырып, жер бетінің шөгуін анықтау. Бұл әдіс барлық тау жыныстары үшін сырғанау сызықтарының қисық сызықтарын құруға негізделген, олар әр тау жынысы үшін беріктік паспортын есептеу деректері бойынша салынған (Kozhogulov K.C., Takhanov D.K. & Kozhas A.K.; 2010; Balpanova M.Zh., Yessenbayeva G.A. & Takhanov D. K., 2017).

Қолданыстағы нұсқаулықтарда жер бетінің шөгуін есептеу кезінде тазартпа қазбасының бүйір аймақтарының деформациясы ескерілмейді. 1-суретте 2-ші отбасындағы $MO'B$ және NOA қисықтары мен тік сызықтар MQ және NR көрсетілген есептік схема берілген.



1-сурет. Тазарту кеңістігінің бүйір жақтарының сығылу деформацияларын ескере отырып, опырылу аймақтарының шекараларын анықтау: H – Кеншоғырды қазу тереңдігі; $H_{сж}$ – бір осьті сығылу түзілу тереңдігі; $L_{об}$ – тазарту кеңістігінің ені; L – қозғалыс мұльдасының ұзындығы; m – қазымдалып жатқан кен орнының қуаты; φ – ішкі үйкеліс бұрышы, град.
 Ескерту – автормен құрастырылған

η анықтау кезінде аудан көлемінің ұлғаюын ескеру қажет (Кожогоулов К.Ч., Таханов Д.К., & Кожас А.К., 2020). Ол үшін B және A және төменгі D және F қазбаларының жоғарғы шекараларының сол және оң жағында сырғанау сызықтарының беттерінің қысу жүктемесінің бағытынан ауытқу бұрыштары қойылады $\varphi = 45^\circ - \rho / 2$ (ρ – ішкі үйкеліс бұрышы). B' және A' нүктелерінен φ бұрыштарының қиылысында E және K нүктелеріне дейін тік сызықтар сызылады. Нәтижесінде EB және AK арақашықтықтары $0.5mtg\varphi$ тең, m – кен орнының қуаты. Бүйірлік жыныстар құлаған жағдайда өндірілген кеңістіктің мөлшері артады:

$$l_m = 2 \cdot 0.5mtg\varphi = mtg\varphi$$

Абсолютті қысу деформацияларын ескере отырып, құлаудың болжамды ауданы:

$$S_{об} = S_{MQRN} + S_{EMNK}$$

мұнда

$$S_{MQRN} = LH_{сж}, \quad S_{EMNK} = 1/2(L+l)(H - H_{сж}),$$

$$L = l + 2(H - H_{сж})tg\theta = mtg\varphi + L_{об} + 2(H - H_{сж})tg\theta, \quad l = mtg\varphi + L_{об}.$$

Егер деформация аймағының шекараларын шектейтін 2-ші отбасының сырғанау сызықтарының қисықтары салыстырмалы түрде түзу болса, жер бетінің шөгуі келесіге тең (Кожогоулов К. Ч., Таханов Д. К., & Кожас А. К., 2020):

$$\eta = H_{сж}(1 - K_p) + \frac{[1/2(L+l)(H - H_{сж})](1 - K_p) + L_{об}m}{L}$$

немесе

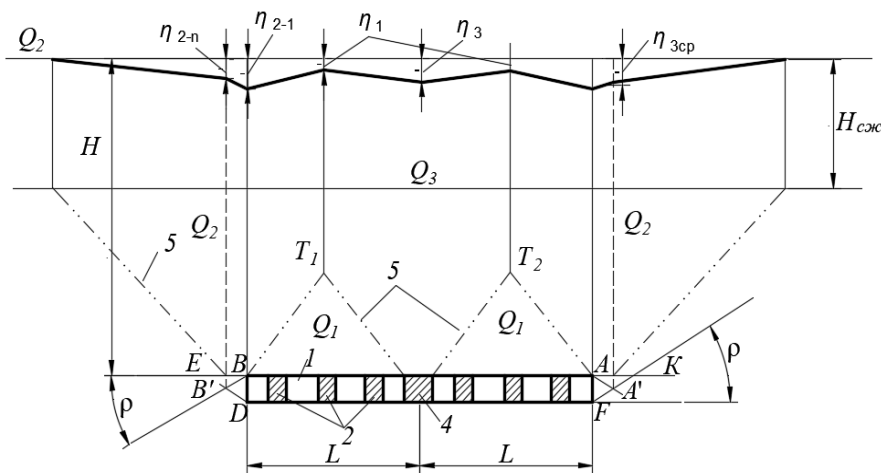
$$\eta = H_{сж}(1 - K_p) + \frac{[(L_{об} + mtg\varphi + (H - H_{сж})tg\theta)(H - H_{сж})](1 - K_p) + L_{об}m}{mtg\varphi + L_{об} + 2(H - H_{сж})tg\theta}$$

Абсолютті деформация аймақтарының шекараларының қисық сызықты түрінде S_{MOB} және S_{NOA} аудандарын алып тастау керек

$$\eta = H_{\text{сж}} (1 - K_p) + \frac{[(L_{\text{OB}} + mtg\varphi + (H - H_{\text{сж}})tg\theta)(H - H_{\text{сж}}) - S_{\text{MOB}} - S_{\text{NOA}}](1 - K_p) + L_{\text{OB}}m}{mtg\varphi + L_{\text{OB}} + 2(H - H_{\text{сж}})tg\theta}$$

Жер асты игеруді жобалау сатысында жер бетінің шөгуді болжау маңызды практикалық мәнге ие, бұл өндірілген объектілерді қорғау бойынша алдын ала шаралар қабылдауға мүмкіндік береді. Қолданыстағы әдістер кен орнының тау-кен-геологиялық жағдайларын толық көрсетпейтін бейінді сызықтар салынған массив жыныстарының деформацияларының натуралық жағдайындағы аспаптық бақылаулардың нәтижелеріне негізделген, сондықтан оларды басқа кеніштерде пайдалануға болмайды (Nizametdinov N.F., Baryshnikov V.D. & Nizametdinov R.F., 2021; Ivadilina, D.T., Issabek, T.K. & Takhanov D.K., 2023).

Ұсынылған әдістеке бойынша жылжу мұлдасының болжамды профилін құру үшін біз H тереңдігінде орналасқан және тосқауыл тұтастығымен бөлінген екі тазарту кеңістігін қарастырамыз (2-сурет).



2-сурет. Бір типті тау жыныстары үшін көлденең және жайпақ шөгінділерді қазу кезінде жылжымалы мұлда профилін құру: 1 – тазарту кеңістігі; 2 – камерааралық кентірекер; 3 – жылжу мұлдасы; 4 – тосқауыл кентірекер; 5 – 2-ші отбасының сырғанау сызығы; Q_2 – тазарту кеңістігінің тау жыныстарының бүйірлік аймақтары қабылдайтын жүктеме; Q_3 – күмбезден кейінгі жүктеме, тосқауылдың кентірегімен қабылданады; Q_1 – камерааралық кентірекер арқылы қабылданатын күмбез асты жүктеме; η_i – жер бетінің есептелген шөгінділері

Ескерту – автормен құрастырылған

Кеңістіктің төбе жыныстарының мен жер бетінің тұрақтылығы камерааралық тұтастықтармен, тазарту кеңістігінің бүйір аймақтарының тосқауыл және берік жыныстарымен қамтамасыз етіледі. Жезқазған кен орнының қабаттарын алевролиттер алып жатыр. Тазарту жұмыстарын жүргізу нәтижесінде деформацияланатын тау жыныстарының шекаралары 2-ші отбасының қисықтарымен анықталады. Жер бетінің тазарту кеңістігінің үстіндегі тіке орын ауыстыруы табиғи тепе-теңдік қоймасының жыныстарынан жүктемені қабылдайтын камерааралық тұтастардың қисылуының абсолютті деформациясы ретінде есептеледі (Сабденбекулы О., Кожас А.К. & Тобагабулова Ж.Б., 2006):

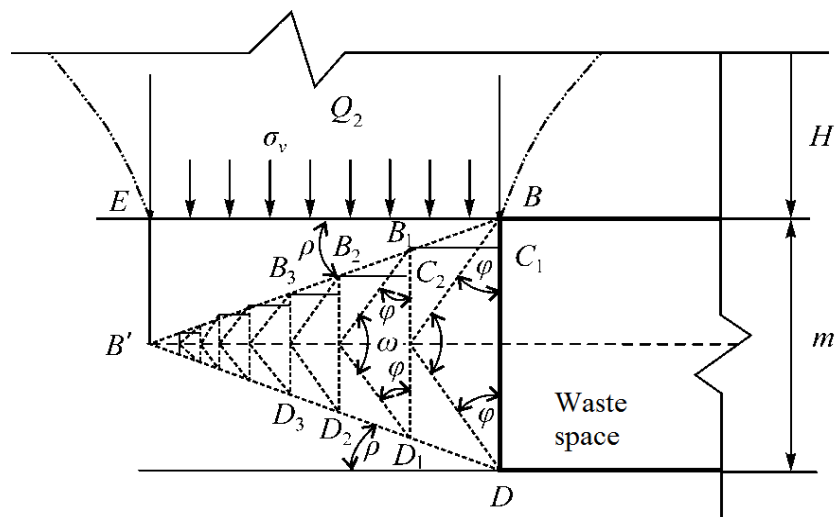
$$\Delta h_{\text{мц}} = h_{\text{мц}} \frac{\sigma - (1 - 2\nu)\gamma H}{E}, \quad \Delta h_{\text{мц}} = \eta_i,$$

мұнда $h_{\text{мц}}$ – камерааралық кентірекердің қуаты, м; ν – Пуассон коэффициенті; γ – жыныстардың көлемдік салмағы, т/м³; H – кеншоғыр тереңдігі, м; E – құмтастың серпімділік модулі, МПа; σ – тау жыныстарының күмбез астыңғы қабатынан кентірекке келетін кернеу $\sigma = \gamma S_{\text{св}} l / q_{\text{мц}} S_{\text{мц}}$, $S_{\text{св}}$ – күмбез ауданы, м²; l – камералар кентірек арасындағы осьтер арасындағы қашықтық, м; $q_{\text{мц}}$ – тосқауылдар арасында орналасқан камерааралық кентірекердің саны; $S_{\text{мц}}$ – камерааралық кентірекердің көлденең қимасының ауданы.

Жер бетінің тік шөгінділері η_2 тазарту кеңістігінің бүйірлік аймақтарының абсолютті сығу деформацияларына тең (2-сурет). Деформацияланатын және судан кейінгі жүктемені қабылдайтын тазарту кеңістігінің бүйірлік аймақтарының ені Q_2 , келесідей (3-сурет). В нүктесінен солға және D нүктесінен тазарту кеңістігінің шекарасынан оңға қарай ρ бұрышы қойылады (сұр құмтас үшін ішкі үйкеліс бұрышы $\rho = 30^\circ$), олардың қиылысу B' нүктесінен E нүктесіне дейін тік сызық сызылады. Сонымен, трапеция $B'EBD$ көлденең қимасы бар EB : $b = 0.5mtg(90^\circ - \rho)$, $b = 1$ м. Бүйірлік аймақтардың тік абсолютті қысу деформациясы $B'DD_1$ үшбұрышынан анықталады. Егер B және D нүктелерінен φ тік жүктемесінен сырғанау сызықтарының беттерінің ауытқу бұрыштарын жүргізетін болсақ, онда біз көлденең қимасы $B_1C_1 \cdot b = 0.5mtg\varphi b$ болатын D_1B_1BD трапециясын аламыз. $B_1C_1DD_1$ көлемінің қысылу деформациялары тепе-теңдік теңдеуінен шыққан және қозғалыс функциясына тәуелділікпен өрнектеледі (3-сурет). B_1C_1 , бетіне, ені 1 м, тік кернеу әсер етеді:

$$\sigma_v = \frac{Q_2}{0.5mtg\varphi}$$

мұнда m – кеншоғыр қуаты, м; $Q_2 = L_{EB} H b$ – тау жыныстарының қалыңдығының салмағы, тазарту кеңістігінің бүйірлік аймағының жыныстарына жатады, т; L_{EB} – тазарту кеңістігінің бүйірлік аймағының жыныстарына жататын тау жыныстары бағанының ені (E және B нүктелері арасындағы қашықтық) м; H – қазу тереңдігі, м; $b = 1$ – тау жыныстары бағанының шартты ені, м.



3-сурет. Тазарту кеңістігінің бүйір беттерінің деформация аймағы

Ескерту – автормен құрастырылған

B_1D_1 беті сығу деформациясын сезінеді (Bruneau G., Tyler D.B. & Hadjigeorgiou J., 2003):

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_v}{E}, \quad (1)$$

ал көлденең кернеуге қатысты $\sigma_b = m_b \sigma_v$, B_1C_1 беті B_1D_1 -ге қатысты салыстырмалы ұзарту болып табылады:

$$\varepsilon_2 = -\mu \frac{m_b \sigma_v}{E} \quad (2)$$

D_1B_1BD трапециясының B_1D_1 бағытындағы толық салыстырмалы деформациясы қосындымен көрсетіледі

$$\varepsilon_y = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3)$$

немесе (1), (2) в (3) ауыстыру арқылы тазартпа қазбасының бүйірлік аймақтарының жыныстарының салыстырмалы сығу деформациясы:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_v}{E} - \mu \frac{m_b \sigma_v}{E}, \quad (4)$$

мұнда $\sigma_v = Q_2 / B_1C_1 \cdot b = Q_2 / 0.5mtg\varphi$ – тау жыныстарының іргелес қалыңдығының массасынан тік кернеу Q_2 , ені $0.5mtg\varphi$ тау жыныстарын тазартпа қазбасының бүйір аймағын құрайтын жыныстарға әсер ететін, т/м²; m – трапецияның биіктігі (кеншоғыр), м; φ – ішкі үйкеліс бұрышы, град; E – құмтастың серпімділік модулі, т/м²; μ – Пуассон коэффициенті; m_b – бүйірлік аралық коэффициенті.

Салыстырмалы қысу (ұзарту) $\varepsilon = \Delta l / l$ немесе $\Delta h_{\text{гр}} / h_{\text{гр}}$ екені белгілі. (4) көмегімен, абсолютті сығу деформациясы тазарту панелінің бүйір беттері:

$$\Delta h_{\text{гр}} = \frac{h}{E} (\sigma_v - \mu m_b \sigma_v), \quad (5)$$

$h_{\text{гр}}$ – қарастырылып отырған трапецияның B_iD_i негізінің ұзындығы, м.

$m_b = \mu / (1 - \mu)$ серпімді деформацияларымен, содан кейін (5) түрін алады

$$\Delta h_{\text{гр}} = \frac{\sigma_v h}{E} \left(1 - \frac{\mu^2}{1 - \mu} \right). \quad (6)$$

Әрі қарай, B_1 және D_1 нүктелерінен φ бұрыштары өткізіледі, көлденең қимасы $0.5B_1D_1tg\varphi b$ болатын $D_2B_2B_1D_1$ трапециясы алынады және (6) бойынша оның сығу деформациялары есептеледі. $B'BD$ үшбұрышының бөлігінің келесі трапециялары соңғы трапецияның жоғарғы жағындағы ені ең кіші болғанша және B' нүктесіне ұмтылғанша есептеледі. n трапецияларының абсолютті қысу деформациялары η_2 (η_{2-1} , η_{2-2} , ..., η_{2-n}) жер бетінің шөгінділеріне сәйкес келеді.

η_3 жер бетінің тік орын ауыстыру тосқауыл кентірек абсолютті сығу деформациясы ретінде есептеледі (2-сурет) тосқауыл кентірегін шеткі нүктелерінен жер бетіне дейін салынған 2-ші отбасының қисықтары арасында қоршалған тау жыныстарының судан кейінгі бағанынан Q_3 жүктемесін қабылдайтын. (Liu J.-P, Feng X.-T & Van Aswegen G., Hadjigeorgiou J., 2018; Diomin V.F., Khalikova E.R. & Diomina T.V., 2019) тармақтарға сәйкес тосқауыл кентірегін абсолютті сығу деформациясы:

$$\Delta h_{\text{от}} = (1 - \nu) \left[\frac{\sigma - \gamma H (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \right] \frac{h_{\text{от}}}{E}, \quad \eta_3 = \Delta h_{\text{от}},$$

мұнда $h_{\text{оц}}$ – тосқауыл кентіректің биіктігі, м; $\sigma = Q_2 / V_{\text{оц}}$ – тосқауыл кентіректің көлденең қимасының ауданына әсер ететін жүктеме, т/м².

$\Delta h_{\text{оц}}$ мәні жер бетінің шөгуге болып табылады η_3 тосқауылдың үстінен. Значение $\Delta h_{\text{оц}}$ и есть оседание земной поверхности η_3 над барьерным целиком. Қарастырылып отырған бөлімге есептелген және сызылған η_1 , η_2 , η_3 , мәндері бір-бірімен тегіс сызықпен қосылып, Q және R нүктелеріне жеткізіліп, қажетті жылжу мульда профилін алады. Оседания земной поверхности η_2 и η_2' при наклонных залежах над левой и правой боковыми зонами очистного пространства отличаются по значению, так как действующие послесводовые нагрузки от толщи горных пород, заключенной между поверхностями линий скольжения, имеют неодинаковые площади и вес.

Қабатталған тау жыныстары бар кен орнының типтік учаскелерін қарастырамыз (4-сурет). *H* тереңдігінде тосқауыл кентіректерімен бөлінген тазартпа қазбалары орналасқан. Тегіс деформация аймағын және $B_n T_1 B_n$, $A_n T_2 A_n$, табиғи тепе-теңдік қоймасының шекараларын шектейтін *EQ* және *KR* сырғанау сызықтарының беттері сәйкес келетін қалыңдықты құрайтын тау жыныстарының әр түрінің әртүрлі деформациялық сипаттамаларына байланысты сатылы пішінге ие. Жер бетінің η_3 тосқауыл кентірегіннің үстіндегі және η_2 тазартпа қазбаларының бүйірлік аймақтарының үстіндегі шөгінділерін есептеу кезінде тосқауыл кентірегіннің сығу деформацияларына және бүйірлік аймақтарға – іргелес қалыңдық жыныстарының сығу деформацияларына қосу қажет. Әрбір жыныс қабатының (құмтастың) сығу деформациялары тосқауыл кентірегіннің сығу деформациялары ретінде есептеледі, яғни есептелген формула қарастырылып отырған құмтас қабатының тереңдігін, қуатын және ені келесі ретпен ауыстырады:

– қазбаның төбе жыныстарының құмтастың бірінші қабаты есептеледі, ол осы құмтас қабатынан жоғары орналасқан тау жыныстарының қалыңдығынан жарық жүктемесін қабылдайды;

– құмтастың екінші қабаты құмтастың екінші қабатынан жоғары орналасқан тау жыныстарының жүктемесіне, сондай-ақ іргелес қалыңдықтың барлық кейінгі қабаттарының сығу деформациясына есептеледі.

Тосқауыл кентірек үстіндегі жер бетінің шөгуге

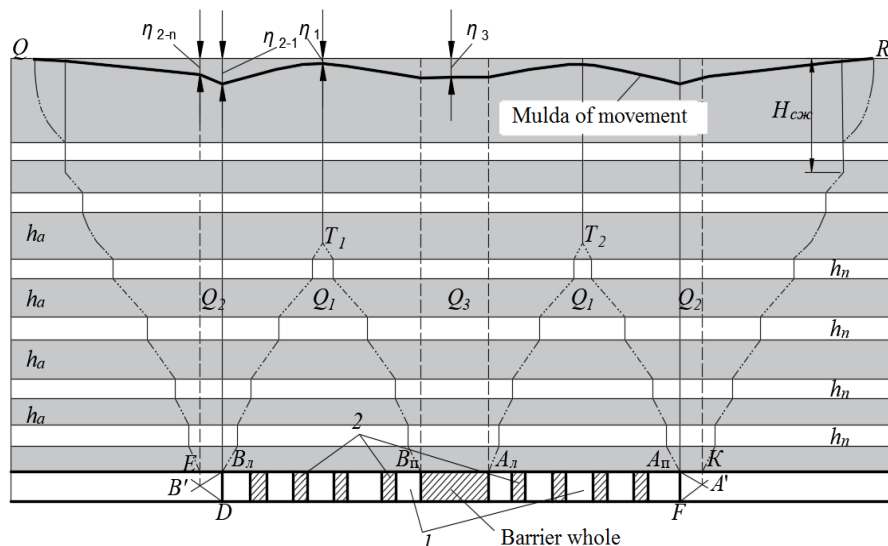
$$\eta_3 = \Delta h_{vc} + \sum \Delta h_{sand},$$

жер бетінің тазартпа қазбасының бүйір аймақтарының үстінен шөгуге –

$$\eta_2 = \Delta h_{bg} + \sum \Delta h_{sand}$$

мұнда $\Delta h_{\text{оц}}$ – тосқауыл кентірегіннің сығу деформациясы, м; $\sum \Delta h_{\text{песч}}$ – тазартпа қазбасының төбе жыныстарынан жоғары орналасқан құмтас қабаттарының сығу деформацияларының қосындысы, м; $\Delta h_{\text{ог}}$ – тазартпа қазбасының бүйірлік аймақтарының абсолютті сығу деформациясы, м.

Нәтижелер және оларды талқылау. Есептелген η_1 , η_2 , η_3 олардың мәндерін *E*, *T*₁, *T*₂, *B*_n, *A*_n, *K* және т. б. тиісті нүктелерінен төменнен сызылған тік сызықтарда жер бетінің деңгейінен төмен қарай қойып, қарастырылып отырған кесуге қолданылады. Тік жылжу нүктелері η_1 , η_2 , η_3 тегіс сызықпен қосылып, Q және R нүктелеріне жеткізіледі. Осылайша олар қарастырылып отырған шарттар үшін қажетті мульда жылжу профилін алады.



4-сурет. Тазарту кеңістігінің орналасу схемасы (1); 2 – камерааралық кентіректер; h_a, h_n – алевролиттер мен құмтастардың қуаты. Алевролиттер сұр, құмтастар ақ түсті
Ескерту – автормен құрастырылған

Жұмыста жер асты тазарту жұмыстарының жер бетінің жай-күйіне әсерін болжауға мүмкіндік беретін жылжу параметрлерін анықтау әдісі ұсынылған, бұл жер бетінің шөгуге мөлшеріне центіректердің абсолютті деформацияларының, тау жыныстарының қосыту коэффициентінің және тазарту кеңістігінің бүйірлік аймақтарының әсер ету дәрежесін ескереді.

Қорытынды. Тау жыныстары мен жер бетінің жылжуын есептеудің ұсынылған болжамды әдісі тау жыныстары массивінде сырғанау сызықтарының қисықтарын құруға негізделген. Қазба күмбез үстінен табиғи тепе-теңдікті құру арқылы жер асты тау-кен жұмыстарының жер бетіне әсер ету дәрежесі белгіленеді. Құлау қоймасының немесе табиғи тепе-теңдік қоймасының шекаралары және жылжымалы мульда аймағы (тегіс деформация аймақтары, қауіпті жылжу және құлау аймақтары, құлаудың пайда болу аймақтары) үш отбасының сырғанау беттерінің көмегімен белгіленеді. Сырғанау сызықтарының қисықтары тау жыныстарының әр литологиялық түрі үшін жеке есептелген және салынған тау жыныстарының беріктік паспорттарына негізделген.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (грант № BR19677938 – «Создание метода прогнозирования сдвижения вмещающих пород до земной поверхности для модернизации технологии повторной разработки пологих рудных залежей»).

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

Әдебиеттер тізімі

- Vyazmensky A., Elmo D., and Stead D. (2010). Role of rock mass fabric and faulting in the development of block caving induced surface subsidence, *Int. J. Earth Sci. Eng.* – P. 534-556.
- Орлов Г.В. (2010). Сдвигение горных пород и земной поверхности под влиянием подземной разработки. – М.: Горн. кн., МГГУ. – 198 с.
- Орлов Г.В., Пашкевич В.В. (2000). О теоретических предпосылках методов расчета сдвижений земной поверхности при подземных разработках // ГИАБ. № 6. – С. 22-27.

- Абдибаитов Ш.А. (2018). Методы исследования и прогноза сдвижения массива горных пород под влиянием подземных разработок // *Современные проблемы механики*. – № 33 (3). – С. 280-285.
- Sahu P., Pradhan M., Jade R., Lokhande R.D. (2021). The influence of geotechnical parameters on sinkhole subsidence and its model development for underground coal mines in central India, *Journal of Mining Science*. – Vol. 57. No 2. – P. 220-228. <https://doi.org/10.1134/S106273912102006X>
- Аверин Г.А., Доценко О.Г., Корецкая Е.Г. (2021). Учет влияния песчаников и известняков на максимальное оседание земной поверхности, вызванное горными работами // *Сб. науч. тр. ДонГТУ*. – № 22 (65). – С. 21-28.
- Kozhogulov K. C., Takhanov D. K., Kozhas A. K., Imashev A. Z., and Balpanova M. Z. (2020). Methods of forward calculation of ground subsidence above mines, *Journal of Mining Science*. – Vol. 56. – No. 2. – P. 184-194. <https://doi.org/10.1134/S1062739120026637>
- Balpanova M.Zh., Yessenbayeva G.A., and Takhanov D.K. (2017). The calculation of the side pressure coefficient in conditions of the limited stress situation // *Bulletin of the Karaganda university-mathematics*. № 2 (86). – P. 14-19. DOI:10.31489/2017M2/14-19
- Демин В.Ф., Халикова Э.Р., Стефлюк Ю.М., Мусин Р.А. (2018). Исследования параметров применения анкерной крепи. *Научный аспект*, М.: Изд-во ООО «Аспект». – № 4. – С. 836-841. https://na-journal.ru/pdf/nauchnyi_aspekt_4-2018_t7_internet.pdf.
- Drizhd, N.A., Rabatuly, M., Aleksandrov, A.Yu., Balniyazova, G., Zhunis, G. (2020). The results of the development of pilot wells in the sherubainurinsky site of the Karaganda coal Basin/Ugol. (6). – P. 36-40, doi: 10.18796/0041-5790-2020-6-36-40
- Кожоголов К.Ч., Таханов Д.К., Кожас А.К., Имашев А.Ж., Балпанова М.Ж. (2020). Разработка прогнозных методов расчета оседаний земной поверхности над горными работами // *ФТПРПИ*. № 2. – С. 31-42.
- Nizametdinov N.F., Baryshnikov V.D., Nizametdinov R.F., Staňková H., Batyrshaeva Z.M., and Igemberlina M.B. (2021). Analysis of ground surface displacements under the influence of repeated mining activities in the Zhezkazgan area, *Journal of Mining Science*. – Vol. 57. – No. 2. – P. 184-189. <https://doi.org/10.1134/S1062739121020022>
- Ivadinilina, D.T., Issabek, T.K., Takhanov, D.K., Yeskenova, G.B. (2023). Predicting underground mining impact on the earth's surface, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. (1). – P. 32-37. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-1/032>
- Сабденбекулы О., Кожас А.К., Тобагабулова Ж.Б., Шалабаев А.Ж. (2006). Определение коэффициента бокового распора в условиях предельного напряженного состояния // *Тр. КарГТУ*. – № 3. – С. 7-9.
- Bruneau G., Tyler D. B., Hadjigeorgiou J., Potvin Y. (2003). Influence of faulting on a mine shaft – a case study: Part I – Background and Instrumentation // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2003. – Vol. 40. – Pp. 95-111. DOI: 10.1016/S1365-1609(02)00115-6.
- Liu J.-P, Feng X.-T, Van Aswegen G., Blake W., Srinivasan C., Rao M. V. M. S., Zembaty Z. (2018). Case histories of rockbursts at metal mines // *Rockburst. Mechanisms, Monitoring, Warning, and Mitigation*. Chapter 3. – Pp. 47-92. DOI: 10.1016/B978-0-12-805054-5.00003-2. .
- Diomina V.F., Khalikova E.R., Diomina T.V., Zhurov V.V. (2019). Studying coal seam bedding tectonic breach impact on supporting parameters of mine workings with roof bolting // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – № 5. – P. 16-21. <http://doi.org/10.29202/nvngu/2019-5/5> <http://nvngu.in.ua/index.php/en/archive/on-divisions-of-science/mining/4991-studying-coal-seam-bedding-tectonic-breach-impact-on-supporting-parameters-of-mine-workings-with-roof-bolting>.

Information about authors

Kozhas Aigul – Candidate of Technical Sciences, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: kozhas@bk.ru , ORCID: 0000-0002-5039-9529

Takhanov Daulet Kairatovich – Candidate of Technical Sciences, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan, E-mail Takhanov80@mail.ru , ORCID: 0000-0002-2360-9156

Rabatuly Mukhammedrakhym – PhD, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: mukhammedrakhym@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7558-128X, +7 702 503 88 81

Sapinov Gylm Kairatovich – Master of Technical Sciences, School of Mining and Earth Sciences, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan, E-mail: gsapinov@mail.ru , ORCID: 0000-0002-1853-6810

Zheldikbaeva Aisaule Takenovna – PhD doctoral student, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, Karaganda, Kazakhstan, E-mail: aisaule89@mail.ru, ORCID: 0009-0002-1325-5576

МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_71
MFTAA 55.01.11

**М.С. Муздыбаев¹, Д.М. Мырзабекова², С.В. Семёнов³,
А.И. Мухамедова⁴, Б.Ж. Есеркегенова⁵**

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

¹E-mail: mmuzdybaev@mail.ru

²E-mail: DMyrzabekova@ektu.kz*

³E-mail: svyatoslav_ukg@mail.ru

⁴E-mail: m_amina1711@mail.ru

⁵E-mail: glamour_25@mail.ru

ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТТЕРДІҢ СТУДЕНТТЕРІН ОҚЫТУДЫҢ ЖАҢА ТӘСІЛІ ИНЖЕНЕРЛІК КАДРЛАРДЫ СЕРТИФИКАТТАУДЫҢ ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТАЛАПТАРЫНА СӘЙКЕСТІКТІҢ КЕПІЛІ РЕТІНДЕ

НОВЫЙ ПОДХОД К ОБУЧЕНИЮ СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ УНИВЕРСИТЕТОВ КАК ГАРАНТИЯ СООТВЕТСТВИЯ МЕЖДУНАРОДНЫМ ТРЕБОВАНИЯМ СЕРТИФИКАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ КАДРОВ

A NEW APPROACH TO TRAINING STUDENTS OF TECHNICAL UNIVERSITIES AS A GUARANTEE OF COMPLIANCE WITH INTERNATIONAL REQUIREMENTS FOR CERTIFICATION OF ENGINEERING STAFF

Аңдатпа. Инженерлік кадрларды сертификаттау инженерлік қызметтің сапасын қамтамасыз етудің негізгі әдістерінің бірі болып табылады. Мақалада инженерлердің халықаралық сертификаттау критерийлеріне сәйкестігін қамтамасыз етуге мүмкіндік беретін білім беру процесін жүзеге асыру тәсілі ұсынылады. Бұл тәсіл CDIO халықаралық бастамасының қағидаттарына сәйкес инженерлік құзыреттерді ғана емес, басқа да дағдыларды дамытудан тұратын «Инженерлік білімге кіріспе» пәнін оқыту форматын өзгертуден тұрады. Ұсынылған тәсілді техникалық жоғары оқу орындарының студенттерін даярлау үшін білім беру бағдарламаларына енгізу үшін қолдануға болады. Талаптарды стандарттауға, тәуелсіз бағалау тетігін қамтамасыз етуге, еңбек нарығында аттестатталатын тұлғалардың бәсекеге қабілеттілігін арттыруға, тұтынушылар үшін жұмыстар мен қызметтердің сапасы мен қауіпсіздігіне кепілдік беруге мүмкіндік беретін инженерлік кадрларды сертификаттау қажеттілік болып табылады. Авторлар осы бағыттағы озық елдердің тәжірибесін қарастырды. Қазақстанда персоналды сертификаттау саласындағы үздік тәжірибені енгізу ұсынылды. Мақала авторлары инженерлік бейіндегі мамандардың халықаралық талаптарға сәйкестік дәрежесін анықтайтын арнайы критерийлерді тұжырымдады. Инженерлік кадрлардың осы талаптарға сәйкестігі техникалық жоғары оқу орындарында оқыту кезеңінде қаланатын оқыту әдістемесін енгізу ұсынылады. Күрделілік терминология мәселелерін жетілдіруге, біліктілік деңгейін нақтылауға, функционалдық міндеттер тізімін жасауға, бірқатар лауазымдарды анықтауға, мансаптық өсу мәселелеріне әкеледі CDIO стандарттарын енгізу үшін жалпы кәсіптік білім беру жүйесін реформалау қажет: оқыту мерзімдері мен шарттары бойынша вариативтілік, пәндердің мазмұнын қайта қарау, сабақтас салалармен өзара байланыс орнату, оқытудың жоспарланған нәтижелеріне қол жеткізу, проблемалық талдау процесіне шешімдерді өзірлеу алгоритмдерін, зерттеу әдістерін, инженерлік этиканы енгізу, жеке және командалық жұмыс тәсілдерін, коммуникация, жобалық менеджмент әдістерін игеру.

Түйін сөздер: сертификаттау, CDIO, инженерлік қызмет, пән, инженерлік кадрлар.

Аннотация. Сертификация инженерных кадров является одним из основных методов обеспечения качества инженерной деятельности. В статье предлагается подход к реализации образовательного процесса, позволяющего обеспечить соответствие инженеров международным критериям сертификации. Данный подход заключается в изменении формата препо-

давания дисциплины «Введение в инженерное образование», заключающийся в развитии не только инженерных компетенций, но и других навыков в соответствии с принципами Международной инициативы CDIO. Предлагаемый подход может быть применен для внедрения в образовательные программы для подготовки студентов технических вузов. Необходимостью является сертификация инженерных кадров, которая дает возможность стандартизировать требования, обеспечить механизм независимой оценки, повысить конкурентоспособность аттестуемых лиц на рынке труда, гарантировать качество и безопасность работ и услуг для потребителей. Авторы рассмотрели опыт передовых стран в данном направлении. Лучший опыт в сфере сертификации персонала предложен внедрить в Казахстане. Авторами статьи сформулированы специальные критерии, определяющие степень соответствия специалистов инженерного профиля международным требованиям. Предлагается внедрить методику обучения, при которой соответствие инженерных кадров данным требованиям будет заложено уже на этапе обучения в технических вузах. Сложность вызывает усовершенствование вопросов терминологии, уточнение уровня квалификации составление перечня функциональных обязанностей, определения ряда должностей, вопросы карьерного роста. Для внедрения стандартов CDIO необходимо реформировать систему профессионального образования в целом: вариативность по срокам и условиям обучения, пересмотр содержания дисциплин, установление взаимосвязи со смежными отраслями, достижение запланированных результатов обучения, внедрения в процесс проблемного анализа, алгоритмов разработки решений, методов исследования, инженерной этики, освоение способов индивидуальной и командной работы, приемов коммуникации, проектного менеджмента.

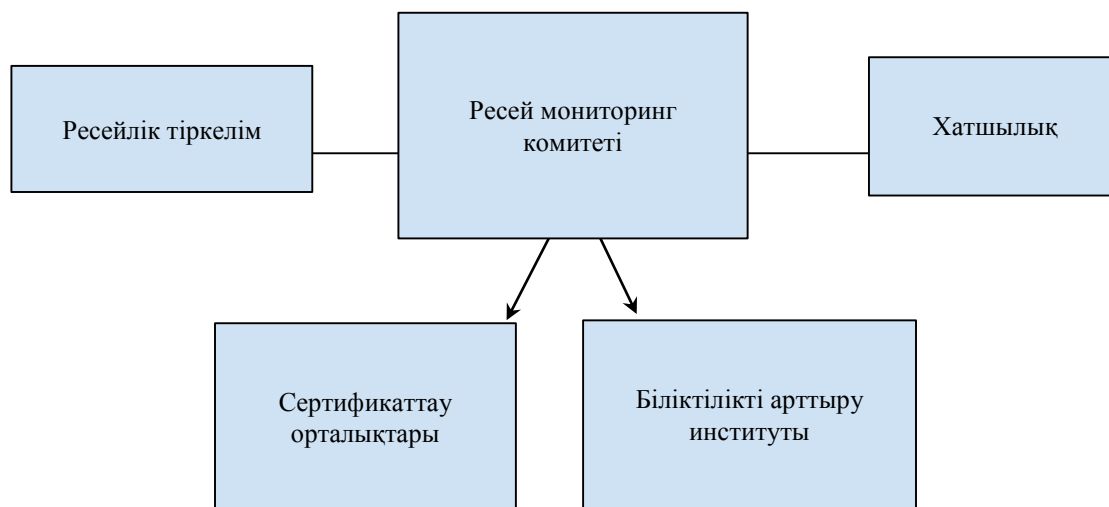
Ключевые слова: сертификация, CDIO, инженерная деятельность, инженерная дисциплина, инженерные кадры.

Abstract. Certification of engineering personnel is one of the main methods of ensuring the quality of engineering activities. The article proposes an approach to the implementation of the educational process that allows engineers to meet international certification criteria. This approach consists in changing the format of teaching the discipline "Introduction to Engineering Education", which consists in developing not only engineering competencies, but also other skills in accordance with the principles of the International CDIO Initiative. The proposed approach can be used for implementation in educational programs for training students of technical universities. Certification of engineering personnel is a necessity, which makes it possible to standardize requirements, provide an independent evaluation mechanism, increase the competitiveness of certified persons in the labor market, and guarantee the quality and safety of work and services for consumers. The authors reviewed the experience of advanced countries in this area. It is proposed to introduce the best experience in the field of personnel certification in Kazakhstan. The authors of the article formulated special criteria that determine the degree of compliance of engineering specialists with international requirements. It is proposed to introduce a training methodology in which the compliance of engineering personnel with these requirements will be laid down already at the stage of training in technical universities. It is difficult to improve terminology issues, clarify the level of qualification, compile a list of functional responsibilities, identify a number of positions, and career development issues. To implement CDIO standards, it is necessary to reform the vocational education system as a whole: variability in terms and conditions of training, revision of the content of disciplines, establishing relationships with related industries, achieving planned learning outcomes, introducing problem analysis, algorithms for developing solutions, research methods, engineering ethics, mastering individual and team work methods, communication techniques, project management.

Keywords: certification, CDIO, engineering activities, engineering discipline, engineering personnel.

Кіріспе. Инженерлік қызмет қоғамның өмірі мен дамуы үшін үлкен маңызға ие. Оның тұрақты дамуына, өмір сүру сапасын жақсартуға және маңызды әлеуметтік және экологиялық мәселелерді шешуге ықпал етеді. Инженерлік қызмет әсер ететін негізгі аспектілердің қатарына инфрақұрылымды дамыту, технологиялық инновациялар, энергетика және тұрақты даму, қоршаған ортаны қорғау, қауіпсіздікті қамтамасыз ету, денсаулық сақтауды дамыту, экономикалық даму, білім беру және ғылыми зерттеулер, әлеуметтік даму, әлеуметтік мәселелерді шешу және т.б. жатады. Сондықтан инженерлік қызметті жүзеге асырудың жоғары сапасына жүйелік негізде кепілдік беру керек (Голиков В.Д. at et., 2022; Похолков Ю. at et., 2004.; Кадырова Г.М., 2019; Левков К.Л. at et., 2012; Аперян А.В., 2011; Леонова И.С. at et., 2020)

Бүгінгі таңда әлемде инженерлік кадрлардың сапасын қамтамасыз ету жүйесінің элементтерінің бірі инженерлерді сертификаттау болып табылады. Қазіргі уақытта инженерлердің кәсіби сертификаттау моделін құрудың халықаралық тәжірибелері белгілі. Жалпы, бұл модель инженерлік біліктілікті растаудың екі сатылы жүйесімен ұсынылған. Бірінші кезең – жоғары білім беру жүйесінде (АВЕТ (АҚШ), ЕСУК (Ұлыбритания), СЕАВ (Канада), JABEE (Жапония) және т.б.) іске асырылатын инженерлік білім беру бағдарламаларын қоғамдық-кәсіби аккредиттеу. Екінші кезең – кәсіби инженерлерді сертификаттау және тіркеу (NCEES (АҚШ), ЕСУК (Ұлыбритания), Engineers Canada (Канада), IPEJ (Жапония) және т.б.). Аккредиттеу және сертификаттау рәсімін үкіметтік емес қоғамдық және кәсіби ұйымдар жүзеге асырады (Чубик П.С. at el., 2010; Чубик П.С. at el., 2012; Чучалин А.И., 2013) Мысалы, Ресейде инженерлік біліктілікті сертификаттау АТМЭЫ инженерлерінің тізілімі негізінде жүзеге асырылады.



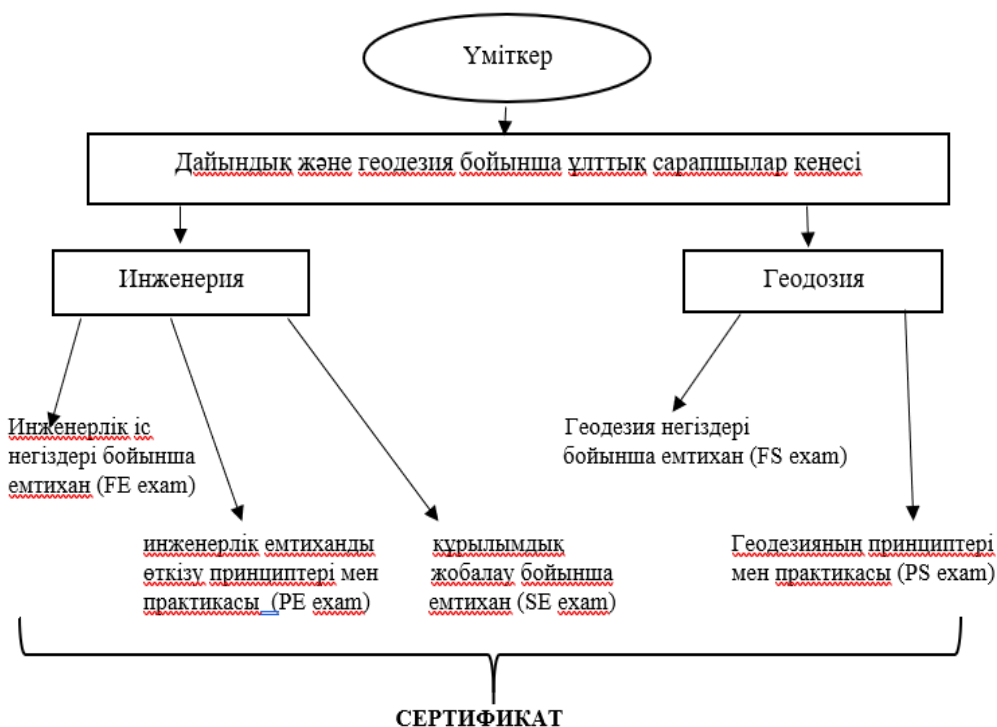
1-сурет. Ресейдегі инженерлік біліктілікті сертификаттау

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Құзыреттерді халықаралық тану АТМЭЫ инженерлік келісімі шеңберінде келісілген критерийлер және «АТМЭЫ инженері басшылығында» сипатталған рәсімдер негізінде жүзеге асырылады. АТМЭЫ инженерлер тізілімінің ұйымдық құрылымына сәйкес сертификаттауға және тіркеуге өтініш беруші қажетті құжаттарды Ресей мониторинг комитетінің Хатшылығына жібереді. Бұдан әрі құжаттар үміткерлердің құзыреттерін тексеру үшін емтихан комиссияларын қалыптастыратын аттестаттау орталығына беріледі. Емтихандар жазбаша және ауызша түрде өткізіледі. Сертификаттау және тіркеу туралы шешімді Ресей мониторинг комитеті қабылдайды.

АҚШ, Канада және Еуропа елдерінде инженер ретінде өз бетінше кәсіби қызмет жүргізу үшін емтихандарды белгіленген тәртіппен тапсыру, қажетті жұмыс тәжірибесін растау және кәсіби инженер лицензиялық атағын алу қажет. Сертификаттаудың негізгі артықшылықтары – талаптарды стандарттау, тәуелсіз бағалау механизмін қамтамасыз ету, еңбек нарығында сертификатталатын тұлғалардың бәсекеге қабілеттілігін арттыру, тұтынушылар үшін жұмыс пен қызметтердің сапасы мен қауіпсіздігіне кепілдік беру (M. Al-Garni., 2002).

АҚШ та кәсіби инженер сертификаттарын алу үшін басқару органы жобалау және геодезия бойынша ұлттық сарапшылар кеңесі болып табылады.



2-сурет. АҚШ-тағы инженерлерді сертификаттау моделі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

NCEES инженерлік лицензия алу үшін FE, PE және SE емтихандарын әзірлейді және бағалайды. 1-кестеде осы емтихандардың түрлері туралы ақпарат берілген. Айта кету керек, әр штатта жеке инженерлік кеңестер бар, өйткені бір штатта алынған кәсіби лицензия басқа штатта инженерлік тәжірибені жүзеге асыруға мүмкіндік бермейді. Басқа штаттарда инженерлік қызметті жүзеге асыру мүмкіндігін алу үшін тиісті штаттың инженерлік кеңесі белгілеген бірқатар қосымша талаптарды орындау қажет.

1-кесте. FE, PE, SE, FS, PS емтихандарының сипаттамалары

Емтихан	Сипаттамасы
FE	ЕАС/АВЕТ аккредиттелген бағдарламасы бойынша инженерлік бакалавр дәрежесін алуға жақын студенттер мен түлектерге арналған
PE	Белгілі бір инженерлік пән бойынша құзыреттіліктің минималды деңгейін тексереді. Ол колледжді бітіргеннен кейін таңдаған инженерлік пәні бойынша кем дегенде төрт жылдық тәжірибеге ие болған инженерлерге арналған
SE	Құрылымдарды жобалау саласындағы құзыреттіліктің ең төменгі деңгейін тексереді. Ол негізінен құрылыс инженерлерін басқа кәсіби инженерлерден бөлек лицензиялайтын юрисдикцияларда тәжірибе жасайтын сынақ инженерлеріне арналған
FS	Аккредиттелген АВЕТ бағдарламасы бойынша геодезия бакалавры дәрежесін алуға жақын студенттер мен түлектерге арналған
PS	Адамның геодезиялық кәсіппен сауатты айналысу қабілетін тексереді. Ол кем дегенде төрт жылдық кәсіби тәжірибесі бар маркшейдерлерге арналған

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Сертификат алу үшін үміткер білім деңгейіне және кәсіби тәжірибесіне қойылатын бірқатар талаптарға сай болуы керек:

– Accreditation Board for Engineering and Technology аккредиттелген колледждің немесе университеттің түлегі болу;

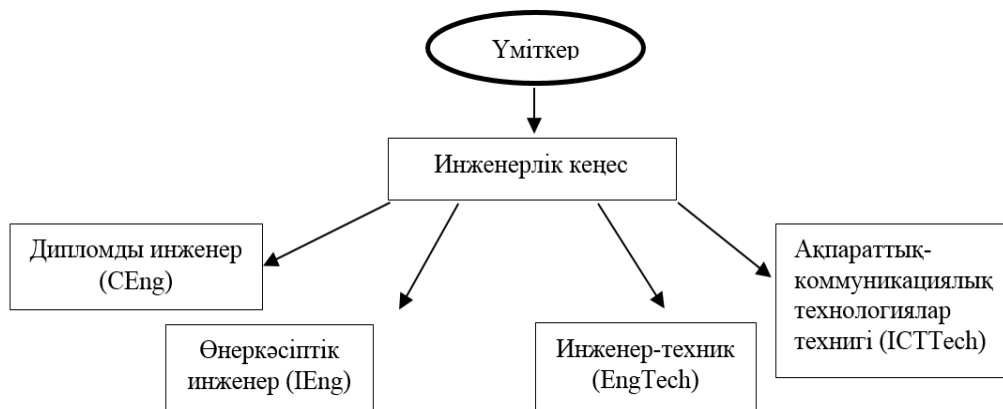
– «Инженерия негіздері» курсы бойынша жазбаша емтихан тапсыру, оның мақсаты негізгі инженерлік принциптерді түсіну дәрежесін тексеру болып табылады;

– белгілі бір инженерлік тәжірибені жинақтау (көптеген Штаттарда жұмыс тәжірибесі кемінде 4 жыл болуы керек);

– тандалған инженерлік пән бойынша (азаматтық, электрлік, өнеркәсіптік, механикалық және т.б.) үміткердің білімі мен дағдыларын, сондай-ақ инженерлік этиканы тексеретін «Инженериядағы принциптер мен практика» жазбаша құжатын толтыру.

Сертификаттау емтиханымен қатар аталған талаптарға сәйкестігін құжаттармен растау, сондай-ақ мінездеме ұсыну – сертификаттаудың міндетті шарттары болып табылады. Сертификат әдетте үш жылға жарамды. Қайта сертификаттау үнемі жетілдіру және даму принциптеріне негізделген. Сертификатты ойдағыдай ұзарту үшін оның иегері өзінің қолданылу мерзімі ішінде кәсіптік жетістіктері немесе оқыту семинарларына қатысқаны және біліктілігін арттырғаны үшін есептелген белгілі бір балл санын құжатпен растауы қажет.

Ұлыбританияда кәсіби қауымдастық болып табылатын инженерлік кеңестің мақсаты – кәсіби құзыреттіліктің халықаралық танылған стандарттарын әзірлеу және қолдау және осы салада этикалық мінез-құлық принциптерін енгізу болып табылады. Оны инженерлік қызметті ұсынатын және реттейтін ұлттық орган ретінде Ұлыбритания үкіметі мойындаған.



3-сурет. Ұлыбританиядағы инженерлерді сертификаттау моделі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Инженерлік кеңес заңмен қорғалған келесі кәсіби атақтарды тағайындайды және бақылайды: дипломды инженер (CEng), өнеркәсіптік инженер (IEng), инженер-техник (EngTech), ақпараттық-коммуникациялық технологиялар технигі (ICTTech).

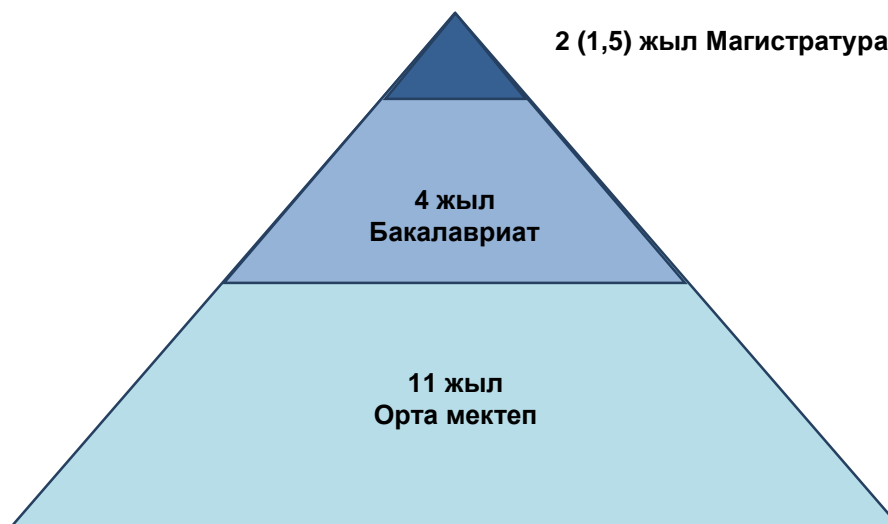
Қазақстанда сертификаттау процесі ерікті және міндетті негізде (денсаулық сақтау, көлік және т.б. салалары) жүзеге асырылады. Қазіргі уақытта Қазақстанда экономика салаларының, еңбек нарығының және кәсіптік білім беру мен оқыту жүйесінің өзара байланысын қамтамасыз ететін біліктілік сұранысы мен ұсынысын құқықтық және институционалдық реттеушілердің тұтас кешені болып табылатын ұлттық біліктілік

жүйесі іске асырылуда. Ұлттық біліктілік жүйесінің негізгі элементтері ұлттық біліктілік шеңбері, салалық біліктілік шеңбері, кәсіби стандарттар, білім беру бағдарламалары және мамандарды сертификаттау болып табылады.

Материалдар мен әдістер. Бұл жұмыста авторлар қызметкерлердің белгіленген біліктілік талаптары мен сипаттамаларына сәйкестігін бағалау үшін қолданылатын процедураларды қоса алғанда, ғылыми зерттеудің сапалы әдістерін қолданды. Тұжырымдамалық-терминологиялық жүйені талдау қолданылды. Сонымен қатар, синтез және талдау әдісі, сондай-ақ аналогия әдісі қолданылды.

Бүгінгі күні инженерлік бейіндегі мамандардың халықаралық талаптарға сәйкестік дәрежесін айқындайтын арнайы критерийлер әзірленді (Francis N. at el., (2023); EUR-ACE® Framework Standards and Guidelines, 2021; Graduate Attributes and Professional Competencies, 2013; Sivajothi Paramasivama. at el., 2013; Martin, R. at el., 2005). Алайда, инженерлік кадрлардың осы талаптарға сәйкестігі техникалық жоғары оқу орындарында оқыту кезеңінде-ақ қойылуы тиіс.

Егер инженерлік мамандарды даярлау жүйесіне талдау жүргізілсе, онда объективті нәтижелер алу үшін жалпы білім беру жүйесін (4-сурет) және ондағы кәсіптік білім беру жүйесін қарастыру қажет.



4-сурет. Жалпы білім беру жүйесі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Өнеркәсіп техникалық және басқа профильдердің кәсіби кадрларын қажет етеді. Техник, инженер, техник, бакалавр, қолданбалы бакалавр сияқты терминдердің жалпы қабылданған ұғымдарының болмауына байланысты түсініспеушіліктер туындауда. Бұл мәселені дұрыс түсіну техникалық кадрларды кәсіби даярлау мәселелерінде шатаспауға мүмкіндік береді.

Біріншіден, мақсаты техникалық құралдар мен технологиялық жабдықтарды пайдаланатын салалардағы еңбек қызметі болып табылатын барлық кәсіби кадрлар техникалық мамандар деп аталуы керек. Екіншіден, техникалық маманның біліктілік деңгейі оның орындайтын функцияларының күрделілігімен анықталуы керек. Олардың жиынтығы функционалдық міндеттердің тізімін жасайды. Осы тізімнің сипатынан еңбек қызметінің қарастырылып отырған бағыты бойынша маман үшін бірқатар лауазымдар мен мансап сатысы қалыптасады (5-сурет).

Бірінші (төменгі) кезең – маман техникалық құралдар мен технологиялық жабдықтардың қалыпты жұмыс істеу режимінде оларды тікелей пайдаланатын не олардың профилактикасы мен жөндеуін жүзеге асыра алатын кезең. Бұл кезеңде жұмысшы маманның деңгейін қарастыру қажет. Бұған бұрын механик-слесарь сияқты жұмысшы деңгейі сәйкес келген. Олардың біліктілік деңгейі, бұрынғыдай, жұмысшы кәсіптерінің санаттары бойынша саралануы керек. Бұл кәсіптерге арналған кәсіптік білім беру жүйесі орта арнайы білім деп аталды.

Екінші (орта) кезең – маманның жұмыс процесінің режимдерін түсінуі және осы негізде төменгі деңгейдегі жұмысшы персоналдың жұмысын ұйымдастыруды және басқаруды жүзеге асыруы қажет кезең. Бұл кезеңде орта буын техникін қарастыру қажет. Бұған бұрын шебердің немесе техниктің деңгейі сәйкес келген, мысалы, техник-механик. Олардың біліктілік деңгейі, бұрынғыдай, санаттар бойынша жіктелуі керек. Бұл кәсіптерге арналған кәсіптік білім беру жүйесі орта техникалық білім деп аталды.



5-сурет. Жалпы кәсіптік білім жүйесі

Ескерту – авторлармен құрастырылған

Үшінші (жоғары) кезең – маманның жұмыс процесінің барлық параметрлерін әзірлеуге және орнатуға қабілетті болуы және осы негізде орта буындағы жұмысшы персоналының өндірісін ұйымдастыруды және оның жұмысын басқаруды жүзеге асыратын кезең. Бұл кезеңде жоғары деңгейлі техникті қарастыру қажет. Бұған бұрын инженер немесе бас инженер (техникалық директор), мысалы, инженер-механик деңгейі сәйкес келген. Олардың біліктілік деңгейі, бұрынғыдай, санаттар бойынша жіктелуі керек. Осы кәсіптерге арналған кәсіптік білім беру жүйесі жоғары техникалық білім деп аталды.

Кәсіптік білім беру жүйесінде оқыту мерзімдері мен шарттары бойынша вариативтілік бар. Атап айтқанда, колледждерде оқығаннан кейін түлек бакалавр академиялық дәрежесін алу үшін университетте қысқартылған бағдарлама бойынша (3 жыл) оқуды жалғастыруға құқылы.

Орта білімі бар бірінші курс білім алушысы және ТЖКБ базасында білім алушыны (колледж түлегі) салыстыратын болсақ, олардың даярлық деңгейі әртүрлі болып келеді. Бұл ретте колледж түлегі бейіндік пәндерді оқып-үйрену тәжірибесіне, арнайы білім мен практикалық дағдыларға, сондай-ақ өндірістік іс-тәжірибеден өткеннен кейін өндірісік тәжірибеге ие болған білім алушы.

Орта білімі бар бірінші курс студенті болашақ мамандық туралы өте үстірт түсінікке ие болуы мүмкін немесе мұндай түсінікке ие болмауы мүмкін. Осы мақсатта білім беру бағдарламасында «Инженерлік білімге кіріспе» пәні енгізілді. Бұрын бұл пән техникалық мамандықтардың оқу жоспарында «Мамандыққа кіріспе» деп аталған. Атаудағы айырмашылық айқын. Бұл жоғары білім беру саласында мамандық бойынша мамандар даярлаудан бағыттар шегінде білім беру бағдарламасы бойынша мамандар даярлауға көшудің салдары болып табылады. «Ол неге міндеттейді?» деген сұраққа жауап беру үшін пәндердің мазмұны қарастырылып салыстырылды.

«Мамандыққа кіріспе» пәні Кеңестік кезеңде құрылды және салалық бағытқа ие болды. Сабактың тақырыбы таңдалған саланың даму тарихын, оның аралас салалармен байланысын зерттеуге арналған материалдарды қамтыды. Саланың дамуындағы тарихи кезеңдерге сипаттама берілді. Қарастырылып отырған кезеңдердегі маңызды оқиғалардың мысалдары ретінде индустрия флагмандарының құрылысы мен жұмысының басталуы, техниканың озық (сол тарихи кезеңге) үлгілерін әзірлеуді, оны өндірудің басталуын және оны ел экономикасына енгізу нәтижесінде қол жеткізілген әсерді көрсететін тарихи фактілер қарастырылды. Әдетте, әрбір маңызды оқиға ұлы ғалымдар мен өндірісті ұйымдастырушылардың, озық кәсіпорындар ұжымдарының еңбегінің нәтижесі болды. Дәріс материалдарында иллюстрациялар, көрнекі құралдар, деректі фильмдер және фотоматериалдар болды. Студенттерге олардың болашақта атқаратын қызметі, кәсіпорындардағы жұмыс орындары туралы айтылды. Олардың болашақ мансаптық өсуінің ықтимал траекториялары мысал ретінде көрсетілді. Көрнекілік үшін өндіріске экскурсиялар ұйымдастырылды, онда студенттер әлеуетті жұмыс орындарына өз көздерімен қарап, салалық құрылымдағы өз орындарын түсіне алды. Әрине, экскурсиялар үшін университеттен топтық сапарға қол жетімді жерде орналасқан саланың ең жақсы кәсіпорындары таңдалды. Көбінесе сабаққа өз кәсіпорнының тарихы, өндірісте шешілетін міндеттер, еңбек жағдайлары және жас мамандарды қолдау бағдарламасы бойынша іске асырылатын әлеуметтік көмек пакеттері туралы әңгімелейтін мамандар мен кәсіпорын басшылары шақырылды.

«Инженерлік білімге кіріспе» пәні соңғы онжылдықта оқу жоспарларына енгізілді. Пәннің парадигмасы да атауымен бірге өзгерді. Салалық ерекшелік өзектілігін жоғалтқан жоқ. Алайда, қазір инженерлік саладағы сапалы білімге және оны үнемі жетілдіру қажеттілігіне баса назар аударылды. Осыған байланысты пән тақырыбында білім берудің кредиттік жүйесі, оның идеологиясы, білім берудің инженерлік бағыты және білім беру бағдарламаларының топтары, таңдалған бағыт бойынша білім беру бағдарламасы, оқу жоспарының құрылымы, жалпы білім беру, базалық және бейіндік пәндердің сегменттері, оларды игерудің логикасы мен реттілігі қарастырылады. Білім алушыда оның оқуына қатысты тұтас көрініс қалыптасуы керек. Тұтастай алғанда, бағдарлама бойынша және пәндердің әрбір циклі бойынша білім алушы оқытудың қандай нәтижелеріне қол жеткізе алатынын, оның ішінде теориялық білімдерін, тәжірибелік дағдылары мен іскерліктерге және қандай пәндер арқылы оларға қол жеткізуге бағытталғанын түсінуі тиіс.

Нәтижелер және оларды талқылау. Білім алушы мамандығы бойынша негізгі тәжірибелік дағдыларды оқу іс-тәжірибесі барысында алады. Мұнда студент базалық инженерлік құзыреттілік (БИҚ) бағдарламасын меңгереді. БИҚ бағдарламасының мақсаты білім алушыны нақты кәсіпорында өндірістік іс-тәжірибеден өтуге дайындау болып табылады. Білім алушыларға өндірістік ортаға барынша ену, кәсіпорындағы міндеттерді шешу процесінің ерекшеліктерін толық қабылдау дуальды оқыту формасын іске асыру кезінде қол жеткізуге болатындығы көрсетіледі. «Инженерлік білімге кіріспе» шеңберінде оқытудың бастапқы кезеңінде дуальды оқытудың ерекшеліктерін, оның өндірістік ортаның нақты бейнесін алу, технологиялық және өндірістік процестерді тәжірибеде зерттеу, сондай-ақ кәсіпорындағы құрылымдық бөлімшелердің өзара іс-қимыл принциптерін іске асыру бөлігіндегі артықшылықтарын түсіндіру студенттерге өндірістік жұмысқа моральдық тұрғыдан дайындалуға, нақты өмірде тәжірибе алуға бағытталуға көмектеседі. Онда құрылымдар мен технологиялар, қолданылатын жабдықтар бойынша жаңа білім алу үшін оқытудың маңыздылығын түсіну студенттерді базалық және бейіндік пәндерді белсенді оқуға ынталандырады.

Білім беру бағдарламасының оқу жоспарын зерделеу барысында білім алушыларға пәндердің қысқаша сипаттамасы ұсынылады, мүмкіндігінше оқу процесі мен ғылыми-зерттеу қызметі үшін пайдаланылатын қолда бар материалдық-техникалық базамен танысу жүргізіледі. Университеттің зертханаларына экскурсия барысында білім алушы өз көзімен зертханалық базаны, технологиялық және сынақ жабдықтарын көреді, жетекші оқытушылармен және ғылыми қызметкерлермен танысады. Осылайша, білім алушының санасында оқу процесінің сипаты, университеттің материалдық жабдыкталуы мен кадрлармен қамтамасыз етілуі туралы тұтас түсінік қалыптасады. Бұл Қазақстандағы және одан тыс жерлердегі жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру ұйымдарымен салыстырғанда университет рейтингін тереңірек түсінуге және қабылдауға әсер етеді.

Білім алушыларға университет түлектерінің еңбек нарығында сұранысы, олардың маман ретінде дайындығы туралы ақпарат ұсынылады. Бұл ретте білім беру қызметінің стратегиясы және білім беру нәтижелерін бағалау саясаты қарастырылады. Білім алушыға жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру ұйымдарында бекітілген білім беру бағдарламасын игеру процесінің табыстылығын бағалаудың интегралдық жүйесі жеткізіледі. Балдық-рейтингтік жүйе бойынша бағалау критерийлерінің тізбесінде академиялық процестің сәттілігін ғана емес, сонымен қатар ғылыми және қоғамдық қызметтің нәтижелілігін бағалау да бар. Мысалы, университеттің гранттық ғылыми және шаруашылық келісім тақырыптары бойынша студенттердің ғылыми-зерттеу жұмыстарына қатысу, университеттің ғылыми конференцияларында, студенттердің ғылыми жұмыстарының конкурстарында баяндамалар жасау. Волонтерлік жұмысқа, жалпы қалалық және облыстық іс-шараларға, сондай-ақ имидждік жұмысқа қатысудың маңыздылығы көрсетіледі. Жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беруді ұйымдастыруда өмірдің барлық салаларына қатысудың маңыздылығын білім алушының санасына жеткізу маңызды.

Білім алушыға жоғары және жоғары оқу орнынан кейінгі білім беру ұйымдарында бекітілген ішкі тәртіп ережелері таныстырылады. Білім алушылардың ішкі тәртіп ережелерін меңгеруі оны өндірістік қызметтің ажырамас бөлігі ретінде еңбек тәртібіне үйретеді. Ғылыми және қоғамдық жұмыстарға қатысуға қызығушылықтың пайда болуымен білім алушыда жан-жақты дамыған және белсенді адамның бейнесі қалыптасып, дұрыс өмірлік ұстанымы бар, өндірісте көшбасшы бола алады және ұжымды басқара алады.

«Инженерлік білімге кіріспе» пәнінің тақырыбында әлемнің жетекші университеттерінде білім беру процесін ұйымдастыруға шолу мен салыстырмалы талдауды қосқан жөн. Ол үшін шетелдік жоғары оқу орындарында жұмыс тәжірибесі бар штаттық

оқытушыларға шолу сабақтарын жүргізуді тапсырған жөн, сондай-ақ әлемнің жетекші университеттерінен профессор шақырған дұрыс болады. Тәжірибелі біздің де, шетелдік оқытушылар да ұсына алатын университеттің оқу процесінің де, сала кәсіпорындарының да проблемаларына жаңа сыни көзқарас студенттерді мамандықты терең зерттеу құралы ретінде оқу процесін түсінуге, сондай-ақ шетелдік жоғары оқу орындарында тәжірибе жинауға ұмтылуға итермелейді. Ол үшін студенттерге академиялық алмасу және шетелдік тағылымдама принциптері түсіндіріледі. Білім алушылар әлемнің жетекші жоғары оқу орындарында жаңа білім алу құралы ретінде шет тілдерін үйренудің маңыздылығын түсінуі тиіс. Осылайша, «Инженерлік білімге кіріспе» пәні ерекше маңызды және оқу процесіне кіріспе болып табылады. Бұл ретте аталған пәнді жүргізетін оқытушы студенттер үшін бірінші гид және нұсқаушы болады.

Бүгінгі таңда Washington Accord, ENAEE, FEANI және басқалары сияқты халықаралық ұйымдар ұсынған инженерлік кадрларды сертификаттаудың халықаралық критерийлерін ескере отырып, проблемалық талдауды, шешімдерді әзірлеуді ғана емес, сонымен қатар зерттеуді, этиканы, жеке және командалық жұмысты, коммуникацияны, жобалық менеджментті қамтитын «Инженерлік білімге кіріспе» пәнін оқыту форматын өзгерту ұсынылады. Ол үшін CDIO Дүниежүзілік бастамасының 4 стандарты қолданылды. Оған сәйкес пән - бұл өнімдерді, процестерді, жүйелер мен қызметтерді құрудағы инженерлік тәжірибенің негізін қалайтын, сонымен қатар негізгі тұлғалық және тұлғааралық дағдылармен және инженерлік контекстегі тұрақты дамудың негіздемесімен таныстыратын кіріспе курсы болып табылады. Осы стандартқа сәйкес «Инженерлік білімге кіріспе» пәнінің мақсаты студенттерді инженерлік қызметтің негіздерімен таныстыру ғана емес, сонымен қатар жеке және тұлғааралық дағдыларды, сондай-ақ кәсіпкерлік білімді қалыптастыру болып табылады.

1-кестеден көрініп тұрғандай, «Инженерлік білімге кіріспе» пәні CDIO (Conceive – Design – Implement – Operate) Дүниежүзілік бастамасын іске асыру шеңберінде инженерлік практика үшін негіз қалыптастыратын алғашқы міндетті курстардың бірі болып табылады. «Инженерлік білім беруге кіріспе» пәні шеңберінде білім алушылар C-D кезеңдерін іске асыратын болады.

Пәннің құрылымына кәсіпкерлік және инженерлік дағдыларды қалыптастыруға арналған бөлімдер кіреді. Пән сонымен қатар студенттерді өнімдерді, процестерді, жүйелер мен қызметтерді құрудың күрделі тәжірибесіне дайындау үшін қажетті жеке білім мен тұлғааралық дағдыларды дамытуға жағдай жасайды. Пәннің нәтижесі өнімдер, процестер, жүйелер мен қызметтерді құру үшін маңызды инженерлік дағдылар мен кәсіпкерлік негіздерін игеру болады.

Білім беру мазмұнын өзгерту оқу жоспарының құрылымдық бөлімдерін нақты түсінуге әкеледі. Кәсіпкерлік дағдыларды дамытуға арналған бөлімнің негізгі міндеттері кейстің берілген параметрлері бойынша идеяларды іздеу; инновациялық шешімдерді пайдалану, ойлау инерциясын еңсеру; өнертапқыштық міндеттерді шешу арқылы білім алушылардың шығармашылық қабілеттерін дамыту; идеяларды іздеу кезінде қайшылықтарды шешу; балама шешімдерді салыстыру және бағалау; дизайн-ойлауды дамыту; жобаның бизнес-моделін әзірлеу; кәсіпкерлік дағдыларды дамыту болып табылады. Инженерлік модульдің міндеттері инженердің міндеттері мен мақсаттарын жалпы сипаттау, инженерлік тәжірибе негіздерімен танысу; белгілі бір мәселені шешуге мүмкіндік беретін өнімнің, процестің, жүйенің немесе қызметтің техникалық идеясын қалыптастыру әдістерімен танысу; техникалық құжаттама негіздерімен танысу; өнімдерді, процестерді, жүйелерді немесе қызметтерді модельдеу негіздерін зерттеу; инженерлік коммуникация және командалық жұмыс негіздерін; жобалық жұмыстың бастапқы дағдыларын қалыптастыру болып табылады.

Қорытынды. Инженерлік білім берудің басты мақсаты индустриялық бизнестегі технологиялық өндіріс қажеттіліктері үшін инженерлік маман дайындау болып табылады. Инженердің міндеттері мен мақсаттарын сипаттауды, сондай-ақ өзекті қоғамдық мәселелерді шешу үшін инженерлік білімді пайдалану әдістерін енгізу арқылы пәндердің мазмұнын жетілдіру ұсынылады. Пәнді оқу білім алушылардың инженерлік тәжірибеге қатысуы, міндеттерді шешу және жеке де, топтарда да жобалау бойынша қарапайым жаттығуларды орындау арқылы жүзеге асырылатын болады. Сонымен қатар, білім алушылар инженерлік қызметте іргелі дағдыларды қалыптастыратын проблемалық-бағдарланған кейстер негізінде қарапайым жобаны әзірлеуге мүмкіндік алады. Осылайша, СДИО халықаралық бастамасының қағидаттарына сүйене отырып, студенттерді даярлауға ұсынылған тәсіл проблеманы талдауға, идеяларды қалыптастыруға, ана және шет тілдерінде коммуникацияны жүзеге асыруға, кәсіпкерлік қызметпен айналысуға қабілетті жаңа форматтағы инженерлерді даярлауға мүмкіндік береді. Барлық аталған дағдылар инженерлік қызмет сапасын қамтамасыз ету жүйесінен – инженерлік кадрларды сертифициттаудан сәтті өтуге мүмкіндік береді.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

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

Әдебиеттер тізімі

- M. Al-Garni. (2002). Engineering certification: academic concerns and industry needs. Symposium on Certification of Practicing Engineers in Saudi Arabia.
- Francis N., Norton E. (2023). Educating civil engineers for the twenty-first century: the new-model engineer / Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering. – Vol. 177, Issue 2, 63-71.
- EUR-ACE® Framework Standards and Guidelines (2021). Edition November 4
- Graduate Attributes and Professional Competencies. (2013). Version 3: 21 June/
<http://www.ieagreements.org>.
- Sivajothi Paramasivama, Kanesan Mutusamyb, Kian Tanc. (2013). Study of the Effectiveness of the Implementation of Washington Accord in Malaysia's Engineering Undergraduate Programme using SEM / 6th International Conference on University Learning and Teaching (InCULT 2012). Procedia - Social and Behavioral Sciences. 90, 803 – 812
- Martin, R., Maytham, B., Case, J., & Fraser, D. (2005). Engineering graduates' perceptions of how well they were prepared for work in industry, European Journal of Engineering Education, 30(2), 167-180.
- Аперян А.В. (2011). Инновации, образование и инженер. Проблемы современного образования: материалы II междунар. науч.-практ. конф. / НИЦ «Социосфера». Прага, № 27, 20-22 // Aperyana A.V. (2011). Inovacii, obrazovanie i inzhener. Problemy sovremennogo obrazovaniya: materialy II mezhdunar. nauch.-prakt. konf. NIC «Sociosfera», Praga, № 27, 20–22.
- Голиков В.Д., Голиков С.В. (2022). Инженерная деятельность в современном обществе: теоретико-методологические обоснования. Вестник ПНИПУ. Социально-экономические науки. – № 1. DOI: 10.15593/2224-9354/2022.1.9 // Golikov V.D., Golikov S.V. (2022). Inzhenernaya deyatelnost v sovremennom obshestve: teoretiko-metodologicheskie obosnovaniya. Vestnik PNIPU. Socialno-ekonomicheskie nauki. №1, DOI: 10.15593/2224-9354/2022.1.9
- Кадырова Г.М. (2019). Инженер – это образование и креативный подход. Русский инженер. – № 1 (62), 12-14 // Kadyrova G.M. (2019). Inzhener – eto obrazovanie i kreativnyj podhod. Russkij inzhener. – № 1 (62), 12-14.
- Левков К.Л., Фиговский О.Л. (2012). Инновационный процесс и инновационный инженер. Инженерный вестник Дона. – № 2 (20), 787-799 // Levkov K.L., Figovskij O.L. (2012) Innovacionnyj process i innovacionnyj inzhener. Inzhenernyj vestnik Dona, № 2 (20), 787-799.

- Леонова И.С., Захарова Л.Н. (2020). Субъективное благополучие как показатель качества трудовой жизни персонала старшего возраста в условиях внедрения инноваций. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Социально-экономические науки. – № 4, 39-53 // Leonova I.S., Zaharova L.N. (2020) Subektivnoe blagopoluchie kak pokazatel kachestva trudovoj zhizni personala starshego vozrasta v usloviyah vnedreniya innovacij. Vestnik Permskogo nacionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Socialno-ekonomicheskie nauki. – № 4, 39-53.
- Похолков Ю., Чучалин А., Боев О. (2004). Бакалавр-инженер: реальность и перспективы для России. Высшее образование в России. – № 9, 3-14 // Pohlkov Yu., Chuchalin A., Boev O. (2004). Bakalavr-inzhener: realnost i perspektivy dlya Rossii. Vysshee obrazovanie v Rossii. – № 9, 3-14.
- Чубик П.С., Чучалин А.И., Замятин А.В. (2010). Система сертификации и регистрации профессиональных инженеров в России на основе международного стандарта APEC Engineer Register. Инженерное образование. – № 6 // Chubik P.S., Chuchalin A.I., Zamyatin A.V. (2010). Sistema sertifikacii i registracii professionalnyh inzhenerov v Rossii na osnove mezhdunarodnogo standarta APEC Engineer Register. Inzhenernoe obrazovanie. – № 6.
- Чубик П.С., Чучалин А.И., Замятин А.В. (2012). К созданию национальной системы сертификации инженерных квалификаций на основе международных стандартов. Инженерное образование. – № 10, 92-98 // Chubik P.S., Chuchalin A.I., Zamyatin A.V. (2012). K sozdaniyu nacionalnoj sistemy sertifikacii inzhenernyh kvalifikacij na osnove mezhdunarodnyh standartov. Inzhenernoe obrazovanie. – № 10, 92-98.
- Чучалин А.И. (2013). Применение стандартов Международного инженерного альянса при проектировании и оценке качества программ ВПО и СПО. Высшее образование в России. – № 4, 12-26 // Chuchalin A.I. (2013). Primenenie standartov Mezhdunarodnogo inzhenernogo alyansa pri proektirovanii i ocenke kachestva programm VPO i SPO. Vysshee obrazovanie v Rossii. – № 4, 12-26.

Information about authors

Muzdybaev M. – candidate of technical sciences, Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: mmuzdybaev@mail.ru ORCID: 0000-0002-1787-0921

Myrzabekova D. – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: DMyrzabekova@ektu.kz ORCID: 0000-0003-4493-6102, +7 777 402 5713

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

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

Eserkegenova B. – PhD, senior lecturer, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, E-mail: glamour_25@mail.ru

МАТЕРИАЛТАНУ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
MATERIAL SCIENCE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_83
MFTAA 53.39.31

Э.С. Сағымбекова¹, Е.А. Кожаметов², Д.М. Аубакирова³

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

¹E-mail: esagymbekova@edu.ektu.kz*

²E-mail: ykozkhakmetov@edu.ektu.kz

³E-mail: danagulbinom2023@gmail.com

ҰНТАҚТЫ МЕТАЛЛУРГИЯНЫҢ КОМБИНИРЛЕНГЕН ӘДІСТЕРІМЕН Ni-Ti-Cu ЖҮЙЕСІ НЕГІЗІНДЕ ПІШІНДІ ЕСТЕ САҚТАУ ҚАБІЛЕТІ БАР ҚОРЫТПАЛАРДЫ АЛУ

ПОЛУЧЕНИЕ СПЛАВОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Ni-Ti-Cu КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

PRODUCTION OF SHAPE MEMORY ALLOYS BASED ON THE Ni-Ti-Cu SYSTEM BY COMBINED POWDER METALLURGY METHODS

Аңдатпа. Мақала Ni-Ti-Cu жүйесіне негізделген пішінді есте сақтау қабілеті бар (SMA) қорытпаларды алу үшін қолданылатын механосинтез және ұшқынды плазмалық қақтау (SPS) сияқты ұнтақты металлургияның заманауи әдістерін қарастыратын қысқаша шолу болып табылады. Пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар медицинадан аэроғарыш өнеркәсібіне дейін көптеген салаларда кеңінен қолданылады, өйткені олардың форманың серпімділігі мен пішінді есте сақтауы сияқты ерекше қасиеттері бар. Дәл осы бірегей SMA қасиеттері оларды алудың жаңа әдістерін, мысалы, ұшқынды плазмалық қақтау әдісін дамытуға қызығушылықты арттырады. NiTiCu қорытпаларының құрылымдық, механикалық және функционалдық сипаттамалары, сондай-ақ олардың басқа SMA-дан артықшылықтарына ерекше назар аударылады.

Жұмыста механосинтез кезеңдері, соның ішінде бастапқы ұнтақтарды таңдау, оларды механикалық активтеу және кейінгі өңдеу толықтай сипатталған. Алынған материалдардың жоғары тығыздығы мен біркелкілігін қамтамасыз ететін ұшқынды плазмалық қақтау процесі де қарастырылады. Өңдеу параметрлерінің қорытпалардың микроқұрылымына, сондай-ақ олардың фазалық түрленуіне және механикалық қасиеттеріне әсеріне ерекше назар аударылады.

Әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктері, сондай-ақ қорытпалардың соңғы сипаттамаларына әсері талданады. Мақалада осы бағытта одан әрі дамыту перспективалары, сондай-ақ SPS көмегімен олардың синтездеу үрдістерін жетілдіру және пішінді есте сақтайтын жаңа қорытпаларды әзірлеу бойынша зерттеулер жүргізу талқыланады. Мақала жақсартылған қасиеттері мен кең қолдану мүмкіндіктері бар жаңа функционалды материалдарды жасау саласындағы болашақ өзіндік зерттеулерге негіз болады. Бұл материал ұнтақты металлургия, материалтану және пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар мәселелеріне қызығушылық танытатын оқытушыларға, докторанттарға, магистранттар мен студенттерге пайдалы болады.

Түйін сөздер: пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар, ұнтақты металлургия, ұшқынды плазмалық қақтау, Ni-Ti-Cu.

Аннотация. Статья представляет собой краткий обзор современных методов порошковой металлургии, таких как механосинтез и искровое плазменное спекание (SPS), используемых для получения сплавов с памятью формы (SMA) на основе системы Ni-Ti-Cu. Сплавы с памятью формы широко используются во многих областях, от медицины до аэрокосмической промышленности, благодаря своим уникальным свойствам, таким как сверхупругость и память формы. Именно эти уникальные свойства SMA вызывают интерес к разработке новых методов их получения, таких как метод искрового плазменного спекания. Особое внимание уделяется структурным, механическим и функциональным характеристикам сплавов NiTiCu, а также их преимуществам перед другими SMA.

В работе подробно описываются этапы механосинтеза, включая выбор начальных порошков, их механическую активацию и последующую обработку. Также рассматривается процесс искрового плазменного спекания, который обеспечивает высокую плотность и однородность получаемых материалов. Особое внимание уделяется влиянию параметров обработки на микроструктуру сплавов, а также на их фазовые превращения и механические свойства.

Анализируются преимущества и недостатки методов, а также их влияние на конечные характеристики сплавов. В статье обсуждаются перспективы дальнейшего развития направления, а также проведения исследований по разработке новых сплавов с памятью формы и оптимизации процессов их синтеза с использованием SPS. Статья служит основой для будущих разработок в области создания новых функциональных материалов, обладающих улучшенными свойствами и широкими возможностями применения. Данный материал будет полезен преподавателям, докторантам, магистрантам и студентам, интересующимся вопросами порошковой металлургии, материаловедения и сплавов с памятью формы.

Ключевые слова: сплавы с памятью формы, порошковая металлургия, искровое плазменное спекание, Ni-Ti-Cu.

Abstract. The article provides a brief overview of modern powder metallurgy methods, such as mechanosynthesis and spark plasma sintering (SPS), used to produce shape memory alloys (SMA) based on the Ni-Ti-Cu system. Shape memory alloys are widely used in many fields, from medicine to the aerospace industry, due to their unique properties such as superelasticity and shape memory. It is these unique properties of SMA that arouse interest in the development of new methods for their production, such as the spark plasma sintering method. Special attention is paid to the structural, mechanical, and functional characteristics of Ni-Ti-Cu alloys, as well as their advantages over other SMAs.

The work describes in detail the stages of mechanosynthesis, including the selection of initial powders, their mechanical activation and subsequent processing. The spark plasma sintering process is also considered, which ensures high density and uniformity of the resulting materials. Special attention is paid to the influence of processing parameters on the microstructure of alloys, as well as on their phase transformations and mechanical properties.

The advantages and disadvantages of the methods are analyzed, as well as their effect on the final characteristics of alloys. The article discusses the prospects for further development of the field, as well as research on the development of new shape memory alloys and optimization of their synthesis processes using SPS. The article serves as a basis for future developments in the field of creating new functional materials with improved properties and wide application possibilities. This material will be useful for teachers, doctoral students, undergraduates and students interested in powder metallurgy, materials science and shape memory alloys.

Keywords: shape memory alloys, powder metallurgy, spark plasma sintering, Ni-Ti-Cu.

Қысқашы. Қазіргі әлем қарқынды дамып келеді және онда озық технологиялар үлкен рөл атқарады. Ғылыми-техникалық прогрестің негізгі бағыттарының бірі – әртүрлі салалардың өзекті мәселелерін шешуге қабілетті бірегей қасиеттері бар жаңа материалдар жасау. Пішін есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды (SMA), атап айтқанда NiTiCu жүйелері инновациялық әзірлемелерге кең мүмкіндіктер ашатын феноменальды қасиеттері бар материалдардың перспективалық класы болып табылады. Алайда, бұл материалдарды алудың дәстүрлі әдістері, әдетте, ұзақ циклдармен және жоғары өңдеу температураларымен сипатталады, бұл олардың кең қолданылуын шектейді. Осыған байланысты процесі оптималдауға және SMA сипаттамаларын жақсартуға мүмкіндік беретін инновациялық әдістерді әзірлеу және енгізу қажеттілігі туындайды. Осындай тәсілдердің бірі ұнтақты металлургия әдістерін, атап айтқанда механосинтезді және ұшқынды плазмалық қақтауды біріктіру болып табылады.

Ұнтақты материалдарға механикалық әсер ету процесі болып табылатын механосинтез біртекті микроқұрылымдардың пайда болуына және қорытпалардың қасиеттерін жақсартуға ықпал етеді. Ұшқынды плазмалық қақтау өз кезегінде жоғары тығыздыққа қол жеткізуге және қақтау процесін жылдам қыздыру және тиімді басқару арқылы дайын өнім құрылымындағы ақауларды азайтуға мүмкіндік береді. Бұл әдістерді біріктіру олардың микроқұрылымы мен функционалдық қасиеттерін бақылаудың жоғары дәрежесін қамтамасыз ететін Ni-Ti-Cu жүйесіне

негізделген пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды жасаудың жаңа мүмкіндіктерін ашады.

Мақалада Ni-Ti-Cu негізіндегі SMA алу үшін механосинтез бен ұшқынды плазмалық қақтауды қолданудың негізгі аспектілері қарастырылады.

NiTiCu жүйесі негізінде пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалардағы деформация және пішінді қалпына келтіру механизмдерін зерттеу. Пішінді есте сақтау – бұл кейбір металл және полимерлі материалдардың бірегей қасиеті, олар термиялық немесе механикалық күш қолданылған кезде деформациядан кейін (температура немесе кернеу жағдайында) бастапқы пішінін (бағдарламаланған пішінін) қалпына келтіре алады. Пішінді есте сақтау материалдарының бұл қабілеті оларды датчиктер мен орындау механизмдері, интеллектуалды құрылымдар, биомедициналық имплантаттар және аэроғарыштық компоненттер сияқты әртүрлі инженерлік қосымшаларда функционалды материалдар ретінде пайдалануға мүмкіндік береді (Chekotu et al., 2019).

Нитинол (никель-титан қорытпасы) – CuZnAl және CuAlNi сияқты басқа жалпы қорытпалармен бірге ең көп қолданылатын пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпа. Сынғыш интерметаллидтердің көпшілігінен айырмашылығы NiTi табиғаты бойынша пластикалық болып табылады, сондықтан жиі таңдалады (Chekotu et al., 2019).

Болаттағы мартенсит ашылғаннан кейін адамдар әртүрлі материалдардың мартенситтік түрленуі бойынша зерттеулер бастады. 1932 жылы AuCd қорытпаларында мартенситтік конверсияның кері конверсиясы табылды. Осы құбылыстың арқасында материалдар механикалық деформацияларға дейін бастапқы пішіні мен өлшемін ала алды және пішінді есте сақтау қабілеті (SME) және пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар (SMA) тұжырымдамасы жасалды. Алғашқы пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаны Arne Olander 1932 жылы ашқанымен, нитинолды Buheler мен Wiley 1960 жылы Naval Ordnance зертханасында алғашқылардың бірі болып алып, SMA-ның нақты қолданылу аясын кеңейтті. Атап айтқанда, оның экономикалық тиімділігі және жұмыс температурасының қолайлы диапазонына (әдетте $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ аралығында) арналған пішін жадына байланысты болды. Бұрын өнімді өндіру үшін сұйық металлургия әдісі қолданылған. Бірақ бірнеше онжылдықтардан кейін ұнтақты металлургия және қосымша өндіріс процестері басым болды. NiTi фазасы мартенситті аустенитке және керісінше айналдыруға қабілетті NiTi қорытпаларындағы жалғыз жауапты фаза. Жоғары жұмыс температурасында термиялық индукцияланған SME мүмкін емес, өйткені ол мартенсит аустенитке айналуы мүмкін болған кезде ғана жұмыс істейді. Аустенитті әрлеу температурасынан асатын жұмыс температуралары кернеуден туындаған SME-ін ғана көрсете алады (S. Kumar Patel, B. Swain, R. Roshan et al., 2020).

Пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпалар (SMA) – пішінін деформацияланғаннан соң деформацияланбаған қалпына келтіре алатын материалдар. Бұл материалдағы мартенсит-аустениттік өзгеруге байланысты. Бұл құбылыс термиялық индукцияланған пішінді есте сақтау эффектісі (SME) деп аталады. Сонымен қатар, бұл түрлендіру салқындату жүйесі жоқ жоғары жұмыс температурасында жүреді. Бұл құбылыс стресс-индукцияланған пішінді қалпына келтіру болып табылады және стресс-индукцияланған пішінді есте сақтау қабілеті деп аталады (сонымен қатар аса-серпімділік немесе жалған-серпімділік деп аталады).

1890 жылдары Адольф Мартенс болатта мартенситтің пайда болуын анықтады. Бұл тарихтағы термиялық әсерге негізделген форманың есте сақтау әсерін жасауға бағытталған үлкен қадам болды. Fe-C жүйесінде аустениттің мартенситке айналуы қайтымсыз (S. Kumar Patel, B. Swain, R. Roshan et al., 2020). 1958 жылға дейін CuZn және InTi сияқты басқа қорытпалар табылды. 1961 жылы АҚШ-тағы әскери-теңіз артиллериялық зертханасында NiTi SMA кездейсоқ табылды. Олар NiTi-ның ыстыққа

төзімділігі мен коррозияға төзімділігін зерттеді. Зертхананың атауына (Naval Ordnance Laboratory) сүйене отырып, ол NiTiNOL деген атпен танымал болды. Алғашқы төрт әріп сәйкесінше Ni және Ti болып табылады. Қалған әріптер ол табылған зертхананың атауын білдіреді. Нитинол өзінің экономикалық тиімділігіне, қол жетімділігіне және пішінді есте сақтаудың жақсы әсеріне байланысты зерттеу қауымдастығының үлкен назарын аударды және қолдану үшін озық материалдар нарығында үстемдік етті.

1965 жылы Бюлер мен Ванг ашқан нитинол 50 атомдық процент (55 салмақ проценті) Ni, ал қалғаны Ti бар тең атомды металлалық қосылыс болып табылады. Алайда, қазіргі нитинол қорытпалары осы элементтерге негізделген екілік композициялардың кең спектрін қамтиды (Kubářová et al., 2024).

Ғылым мен техниканың жетістіктері әртүрлі салаларда нитинол негізіндегі қорытпаларды кеңінен енгізуге әкелді. Нитинол пішінді есте сақтау қабілеті (SME) және суперикемділіктен (SE) басқа, никель иондарының ықтимал бөлінуіне қатысты аландаушылыққа қарамастан, керемет биоүйлесімділікті көрсетеді. Оның коррозияға төзімділігі 300 сериялы тот баспайтын болаттан және титан қорытпаларынан кем түспейді және оны қорғаныс қабаттарын құрайтын бетті өңдеу арқылы одан әрі арттыруға болады. Сонымен қатар, нитинол адам ағзасының ортасында жоғары тозуға төзімділікті көрсетеді. Осы сипаттамалардың үйлесімі оны медициналық құрылғыларға өте қолайлы етеді, бұл оның биомедицинада кеңінен қолданылуына ықпал етеді. Нитинолдың алғашқы медициналық қолданылуы 1970 жылдары өте серпімді нитинол брекеттерінен пайда болды. Содан бері оның ауқымы кеңейіп, қазір әртүрлі медициналық құрылғыларды, соның ішінде стенттерді, экстракторларды, жасанды жүрек клапандарын, констрикторлық бекіткіштерді, шегелер мен пластиналарды қамтиды. Дегенмен, қазіргі қолданбалар көбінесе қарапайым пішіндер мен кішірек өнім өлшемдерін қамтиды (Kubářová et al., 2024).

Пішінді есте сақтау қабілеті бар никель-титан қорытпалары (Wen et al., 2021) пішінді есте сақтау эффектісіне, шамадан тыс серпімді әсерге, демпферлік қасиеттерге, биоүйлесімділікке және коррозияға төзімділікке ие, олар аэроғарыштық, биомедициналық, автомобильдік, құрылыс және икемді электроникада кеңінен қолданылады.

Осылайша, Ni-Ti қорытпаларынан жасалған кеуекті құрылымдар энергияны сіңірудің тамаша қабілетіне, жоғары демпферге, жоғары меншікті беріктікке және жеңілдік үшін биоүйлесімділікке ие, олар әдетте діріл сөндіргіштер, биологиялық сүйек импланттары, микро діріл тосқауылдары және смарт жетектер сияқты функционалды бөлшектер үшін пайдаланылады (Tang et al., 2023).

Ti-Ni негізіндегі қорытпалар жеткілікті пластикалық екені белгілі, оларды белгілі жағдайларда 60 % суық өңдеуге болады, бірақ олар металлалық қосылыстардың бір түрі болып табылады. Алайда, Cu 12,5 ат.%-дан асатын Ti-Ni-Cu қорытпалары сынғыш әрі пластикалық деформацияланбайды. (Popova et al., 2020) пластиналық құрылымдардың пайда болуы сынғыштыққа әкелуі мүмкін деп хабарлады. Сондықтан, Ti-Ni-Cu қорытпалары Ti-Ni екілік қорытпаларымен салыстырғанда жоғары пішінді есте сақтау әсерінің көрсеткіштері мен жылу және кернеулі гистерезистің төмендеуіне байланысты үлкен назар аударғанымен, олардың нашар өнімділігі Ti-Ni-Cu пішінді есте сақтау қорытпаларының практикалық қолданылуын тежейді. Соңғы жылдары балқыманы иіру әдістері олардың ішкі өңдеу шектеулерін болдырмау үшін мыс мөлшері жоғары Ti-Ni-Cu қорытпаларын жасау үшін қолданылады. Сондай-ақ, Ti-Ni-Cu қорытпасынан жасалған ленталар қалыпты құюдан жасалған қорытпалармен салыстырғанда жоғары пішінді есте сақтау сипаттамаларына және супер серпімділікке ие екендігі туралы хабарланды. Дегенмен, таспалардың қалыңдығы мен пішініне қатысты шектеулер бар. Әдетте балқытылған таспалардың қалыңдығы 15-40 мкм, ал олардың пішіні әдетте жұқа және тегіс (Popova et al., 2020).

10 ат.% дейін концентрациясы бар Ti-Ni-Cu пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларында Cu мартенситтік түрленуі (MT) екі сатылы процесс болып табылады, яғни B2 \leftrightarrow B19 (орторомбиялық) түрлендіруден кейін B19 \leftrightarrow B19' (моноклиндік) түрлендіру жүреді, ал құрамында Cu 10 ат.%-дан астам қорытпалар B19 мартенситке бір сатылы түрлендіру арқылы айналады. Бұл модельдер атқарушы жүйелердің жауап беру уақытын арттыра алатын тар гистерезисіне байланысты SMA жетектері үшін үлкен қызығушылық тудырады. Алайда, 10 ат.%-тен асатын Cu қосу қорытпаның қалыптылығын бұзады, деформация қадамдарынсыз технологияны қажет етеді (Cirstea et al., 2021).

Ni-Ti-Cu пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды өндіруге арналған ұнтақты металлургияның мүмкіндіктері. Кең ауқымда қолданылатын TiNi қорытпаларын алу үшін әртүрлі әдістер бар. Өндірістің жалпы қабылданған және коммерциялық мақұлданған әдістерінің бірі – құю әдісі. Дегенмен, бұл дәстүрлі әдіс соңғы өнімді алғанға дейін балку, құю және кейінгі өңдеу кезеңдерінен өтетін көп сатылы процесс (Samal et al., 2021). Балку микро және макробөлшектерге әкелуі мүмкін, бұл өңдеу процесінде элементтік құрамның химиялық гетерогенділігіне және тотығуына әкелуі мүмкін. Бұл соңғы өнімдегі қоспалардың көбеюіне әкелуі мүмкін. Кейінгі өңдеу кезеңі деформацияға төзімді болуы мүмкін NiTi қорытпасының қатаюына әкеледі.

Нитинол қорытпалары титанның жоғары тосындылығына және өте төмен өңделуіне байланысты жасау және өңдеу қиын. Дәстүрлі өңдеу әдістері, соның ішінде құю және ұнтақ металлургиясы нитинолды өңдеуде бірқатар мәселелерге ие. Бұл мәселелерді келесідей қорытындылауға болады (S. Kumar Patel, B. Swain, R. Roshan et al., 2020):

- Біртекті құрамға қол жеткізу;
- Күрделі геометриялық пішіндерді жасау;
- Өңдеудің төмен деңгейі (жоғары икемділік және Ni-Ti абразивтілігі);
- Сапалы Ni-Ti ұнтағын сатып алу (оксидтер мен қоспалар жоқ);
- Инертті атмосфераны қамтамасыз ету (тотығуды болдырмау үшін);
- Қоспалардың болмауы (трансформация температурасына және жарықтардың таралуына әсер етеді);
- Ақаулар мен қажетсіз кеуектіліктің алдын алу (жүктемені азайтады, жарықтардың пайда болуын/таралуын бастайды).

Алайда, Ni-Ti қорытпасының жоғары икемділігі, қалпына келтіру әсері және деформацияны күшейтетін қасиеттері никель-титан қорытпасынан жоғары сапалы және жоғары дәлдіктегі бөлшектерді өңдеуді өте қиын етеді. Сонымен қатар, токарлық және фрезерлік өңдеу, соғу және құю арқылы күрделі құрылымы бар Ni-Ti қорытпасынан бөлшектер жасау қиын, бұл оның қолданылуын айтарлықтай шектейді. Сондықтан Ni-Ti қорытпасын күрделі құрылымға дейін кеңейтуді және оның өнімділігін одан әрі жақсартуды жүзеге асыру үшін Ni-Ti қорытпасын қалыптаудың жаңа технологиясын іздеу қажет.

Стандартты NiTi қорытпаларын өндірудегі бұл кедергілер мен шектеулер зерттеушілерді NiTi қорытпаларын өндірудің басқа, қарапайым, уақытты үнемдейтін және тиімді әдістерін табуға мәжбүр етті.

Жақында зерттеушілер NiTi қорытпаларын алудың альтернативті әдістеріне назар аударды. Ұнтақты металлургия (PM) – бұл престоу мен қақтаудың кешенді процесі. PM ұнтақ материалдарын қолдана отырып, дәстүрлі құю әдістерімен байланысты мәселелерді шешу үшін жасалған. PM технологиясы химиялық біртексіздікті болдырмайтын және соңғы өнімді алудың бір сатылы процесін қамтамасыз ететін фазалық бөлінусіз оттегі мен көміртегі сияқты қоспалардың минималды мөлшерін қамтамасыз етеді. PM әдісімен NiTi қорытпаларынан жасалған бөлшектер жұқа және

біркелкі микроқұрылымның арқасында жақсы физикалық және механикалық қасиеттерге ие. Алайда, шектеулердің бірі РМ арқылы күрделі пішінді бөлшектерді жасау мүмкіндігі төмен (Samal et al., 2021).

Ұнтақты металлургия – бұл сынғыш Ti–Ni–Cu қорытпаларының бөлшектерін алудың перспективті әдісі, өйткені ол қымбат өндеуді, термомеханикалық өндеуді және соған байланысты материалдардың жоғалуын болдырмайды немесе азайтады.

Басқа материалдарды қосу арқылы мақсатты құрылымның механикалық қасиеттерін жақсарту ең кең таралған әдістердің бірі болып табылады. Ni-Ti кеуекті құрылымдарын алу үшін өздігінен таралатын жоғары температуралы синтезді қолданды және Ni-Ti кеуекті құрылымдарының макроқұрылымына, микроқұрылымына және механикалық қасиеттеріне алюминий қоспасының әсерін зерттеді (Monogenov et al., 2022).

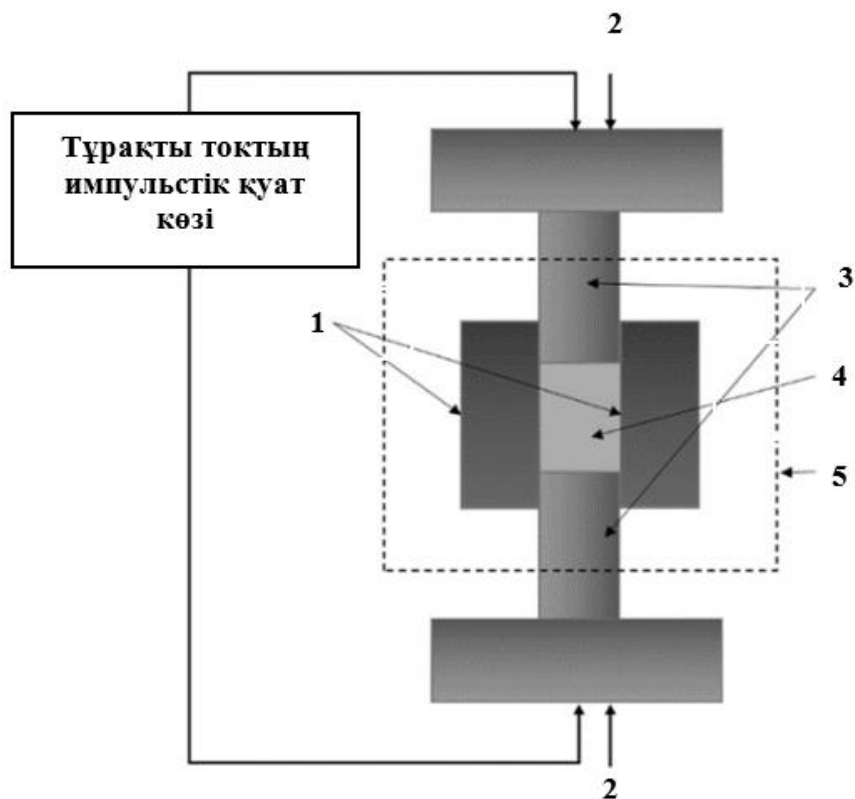
Cu қоспаларының әртүрлі концентрациясы бар Ni-Ti негізіндегі кеуекті қорытпалардың физика-механикалық қасиеттерін зерттеді. Зерттеу көрсеткендей, Cu қоспалары Ni-Ti қорытпаларының қасиеттерін күшейтеді (Kaftaranova et al., 2022).

Сонымен қатар, (Bewerse et al., 2015) толығымен өзара байланысты үш өлшемді микроарналары бар кеуекті Ni-Ti құрылымдарын алу үшін болат сымды кеңістіктік тірек ретінде пайдалануды көздейтін ұнтақ металлургия әдісін қолданды. Бұл әдіс микроарналардың көлемдік үлесін дәл бақылауға мүмкіндік береді. Зерттеушілер оңтайландырылған өндеу пішінді жады қасиеттерін тудырғанын байқады, бұл дизайнды энергияны сіңіруге немесе дискілерде қолдануға өте қолайлы етеді. Бұл зерттеу жеке қасиеттері бар инновациялық азот нитридті кеуекті құрылымдарды жасау үшін осы тәсілдің әлеуетін көрсетеді. Дегенмен, осы материалдардың осы салалардағы әлеуетін толық зерттеу және кеңейту үшін қосымша зерттеулер қажет.

NiTiCu жүйесі негізінде SMA алу кезінде ұшқынды плазмалық қақтау (SPS) технологиясын қолданудың артықшылықтары мен ерекшеліктері. Ұнтақты металлургияның әртүрлі әдістері бар, мысалы, кәдімгі қақтау (CS), өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез (SHS), қысымда металл құю (MIM), ыстық изостатикалық престеу (HIP), ұшқынды плазмалық қақтау (SPS), плазмалық балқу, микротолқынды қақтау әдістері (MWS). Барлық осы қақтау процестерінің ішінде ұшқынды плазмалық қақтау әдісі реакция процесінің қысқа уақытымен ерекшеленеді. SPS процесі 900-ден 1100 °C-қа дейінгі төмен қақтау температурасында жүзеге асырылуы мүмкін, бұл біркелкі қақталуды қамтамасыз етеді және қажетсіз реакция өнімдері мен жоғары қыздыру жылдамдығын болдырмайды, сонымен қатар жанама өнімдердің жоғары консолидациясын қамтамасыз етеді.

Жалғыз шектеу – бұл процесс күрделі пішінді материалдарды алуға мүмкіндік бермейді. Ұшқынды плазмалық қақтау (SPS) – ұнтақтарды тығыздау үшін қысым мен импульстік тұрақты ток бір уақытта қолданылатын қақтаудың жаңа әдісі (Bewerse et al., 2015). SPS – ұнтақтарды тығыздау үшін тұрақты токтың электрлік импульстары мен бір осьтік қысымды қолданатын әдіс. Қысымды қолданумен бір мезгілде жүктеме қақтау процесінің қосымша қозғаушы күші ретінде әрекет етеді, бұл қақталған қорытпалардың тығыздығы мен түйіршіктілігінің жоғарылауына әкеледі. Зерттеушілер бұған дейін NiTi қорытпаларының соңғы микроқұрылымы мен тығыздауында маңызды рөл атқаратын қақтау уақыты мен температурасы және жүктеме мөлшері сияқты өндеу параметрлерін зерттеген. Қақтау температурасы тығыздау механизмдерінде, микроқұрылым эволюциясында және ұшқынды плазмалық қақталған қорытпаның механикалық қасиеттерінде маңызды рөл атқарады. Бөлшектердің қайта орналасуы, локализацияланған деформация және көлемдік деформация тығыздау үшін қолданылатын ұнтақ бөлшектерінің өлшем диапазонына негізделген қақтау механизмінің тізбегі болып көрінеді. Ықшамды қақталған қорытпаның беріктігі микротүйіршіктердің орналасуымен анықталатын

микроқұрылымға байланысты (Samal et al., 2021). Ұшқынды плазмалық қақтау (SPS) қондырғысының схемасы 1-суретте көрсетілген.



1-сурет. SPS қондырғысының схемалық көрінісі: 1 – штамп, 2 – қысым, 3 – поршень,
4 – ұсақталған ұнтақ, 5 – вакуумды камера

Ескерту – авторлармен (Bahador, 2017) негізінде құрастырылған

SPS процесінде графит матрицасы стандартты қақтау материалы ретінде қолданылады. Алайда, жақында аустенитті болат графитті алмастыра алатын жаңа материалға айналды. Демек, бұл материалдардан жылу шығынын азайтып, қақталған жанама өнімде жоғары тығыздыққа қол жеткізе алады. Нәтижесінде қақтау процесі уақыты мен температурасы аз әрі функционалды болды, бұл құрылымның біртектілігіне әкелуі мүмкін. NiTi қорытпалары саласындағы SPS процесі негізінен қақталған NiTi қорытпаларының микроқұрылымдық эволюциясы бар тығыздау аймағындағы шығуды қамтиды. Дегенмен, NiTi қорытпалары пішінді есте сақтау қабілетінің функционалды қасиеттері тұрғысынан көбірек қолданылады. NiTi ұшқынды плазмалық қақталған қорытпаларының SME қасиеттері іс жүзінде талқыланбайды. Кейбір зерттеушілер қысу кернеуі мен индукцияланған пластикалық деформация кезінде механикалық қасиеттерді бағалауға көшті. Дегенмен, әлі күнге дейін түйіршіктердің таралуы тұрғысынан қақталған қорытпаның SME әсерін талдау бойынша зерттеулер жетіспейді. Кейбір мақалаларда бұл қорытпа туралы айтылғанымен, қорытпалардың пішіні мен функционалды қасиеттерін есте сақтау әрекетін зерттеуге арналған басылымдар аз немесе мүлдем жоқ.

Импульстік токтың рөлі плазма мен джоульдік қыздыру әсерін жасау болып табылады, бұл қақтау кезінде ұнтақтардың байланысуына және қатаюына ықпал етуі

мүмкін. Осылайша, SPS басқа дәстүрлі қақтау процестерімен алу қиын материалдарды жылдам жасаудың артықшылығына ие. Дегенмен, SPS ұнтағын біріктіру кезінде плазмалық ұшқындардың болуы және қақтау механизмі туралы ортақ тұжырым жоқ. Дегенмен, джоульдік қыздырудың ұнтақтың жанасу аймақтарында локализацияланған жылуды бастауға және қатты күйдегі диффузияға әсерін зерттеушілер кеңінен мойындайды. (Cirstea et al., 2024) қақтау процесінде эксперименттік демонстрация жасау арқылы ұшқынды плазманы алу мүмкіндігіне күмән келтірді. (Zhang et al., 2014) жоғары температуралы ұшқынды плазманың пайда болғанын хабарлады. Олар ұшқынды плазма тұрақты ток импульсін қосу-өшіру басында ұнтақ бөлшектері арасындағы электр разрядының әсерінен саңылауларда пайда болуы мүмкін деп болжады. Сонымен қатар, қысқа уақыт ішінде тиімді қақтау процесі үшін келесі факторлардың жиынтығы қажет: ұшқынды разряд, джоульдік қыздыру, электрлік диффузия және пластикалық деформация. SPS ұнтақ металлургиясында көптеген металл ұнтақтарын алу үшін, соның ішінде Ti–Ni негізіндегі SMA жасау үшін қолданылады, бірақ Ti–Ni SMA пішінінің қасиеттеріне қайталама процестердің әсері туралы шектеулі зерттеулер бар. Осылайша, бұл зерттеуде ұшқынды плазмалық қақталған Ti–51% Ni SMA деформациясы үшін еркін соғу (ашық штамптау) деп аталатын қайталама процесс қолданылды және нәтиже микроқұрылым мен аса серпімділік тұрғысынан еркін соғусыз өңделген үлгімен (өңделмеген үлгі) салыстырылды.

Бөлшектердің мөлшері мен термостаттау температурасын зерттеу NiTi қорытпаларын қақтауда маңызды рөл атқарады. Жақында NiTi пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларын жеңілдету үшін өздігінен таралатын жоғары температуралы синтез, микротолқынды қақтау, қысымда металды құю, кәдімгі қақтау және таңдамалы лазерлік балқыту сияқты ұнтақты металлургияның әртүрлі әдістері қолданылды. Өндірілген материалдар үшін алынған соңғы тығыздық қақтау процесінің тиімділігін анықтайды. SPS материалдарды төмен температурада қысқа уақыт ішінде толық тығыздыққа дейін қақтау үшін қолданылған. Бөлшектердің беттері арасындағы тиімді байланыс арқылы SPS процесінде материалдардың жоғары тығыздығына қол жеткізуге болады. SPS кезінде жүктемені қолдану арқылы булану және балку бөлшектер арасындағы тиімді байланысқа әкелді. SPS процесі кезінде жылу графит соққысы мен матрицалар арқылы импульстік ток ағынымен және ақырында ұнтақ бөлшектерімен пайда болады. Осылайша, ұнтақ бөлшектері арасында разряд пайда болуы мүмкін, бұл бөлшектердің жанасу беттерінде жоғары температураның пайда болуына әкеліп соғады, нәтижесінде жергілікті балку пайда болады. Мойындар (necks) ұнтақ бөлшектерінің арасында пайда болды, өйткені балқытылған аймақтар бір-біріне жабысып, беттерге жылуды жылдам беру арқылы қатаяды. Қақтау температурасы белгілі бір уақыт аралығында біркелкі сыртқы қысыммен сақталатындықтан, диффузия түйіршіктердің бетінде және шекарасында жүреді. Осылайша, жоғары тығыздалған өнімді SPS процесі арқылы вакуумды доғалық балқыту, вакуумды индукциялық балқыту және микротолқынды қақтау сияқты басқа дәстүрлі қақтау әдістерімен салыстырғанда қысқа уақыт ішінде алуға болады (C. Velmurugan et al., 2018).

Қысым, температура, уақыт, импульстік ток және кернеу сияқты SPS параметрлері қақталған өнімдердің механикалық және микроқұрылымдық сипаттамаларына әсер етеді. Бөлшектердің мөлшерінің, қысымының және қақтау температурасының мыс ұнтағының тығыздағышына әсерін бағалау мақсатында жүргізілген ертерек жүргізілген зерттеу тығыздауға негізінен бөлшектердің мөлшері мен қақтау температурасы әсер ететіндігін анықтады. SPS әдісіндегі ұнтақ бөлшектерінің мөлшері деформацияға, бөлшектердің нақты бетіне, жергілікті қысымға және ток күшіне байланысты болды. Қақтау температурасы 1000-нан 1100 °C-қа дейін көтерілгенде, SPS арқылы алынған Ti қорытпасының

тығыздығы 97-ден 99 %-ке дейін артатыны анықталды. Сол сияқты, SPS әдісімен өңделген вольфрам ұнтағының салыстырмалы тығыздығы 81 %-тен 95 %-ке дейін ұлғайтылды, қақтау температурасы 1600-ден 1800 °C-қа дейін көтерілді. NiTi-де аустениттің (B2) қажетті фазасының түзілуі қақтау температурасының жоғарылауымен және Ni₃Ti және Ti₂Ni сияқты қажетсіз қайталама фазалардың азаюымен жоғарылауы мүмкін (Veltingan et al., 2018). Осылайша, қақтау температурасы мен бөлшектердің мөлшері SPS әдісімен қақталған өнімнің тығыздығы мен микроқұрылымына айтарлықтай әсер етеді.

Қорытынды. Механосинтез және ұшқынды плазмалық қақтау сияқты ұнтақты металлургия әдістері Ni-Ti-Cu жүйесіне негізделген пішінді есте сақтау қорытпаларын алудың перспективалы технологиялары болып табылады.

Механосинтез біртекті микроқұрылымды қалыптастыруға және қорытпалардың беріктігін арттыруға ықпал ете отырып, жақсартылған қасиеттері бар нанокұрылымды ұнтақтарды алуға мүмкіндік береді.

Ұшқынды плазмалық қақтау ұнтақтардың салыстырмалы түрде төмен температурада тез және тиімді қақтауды қамтамасыз етеді, өңдеу уақыты мен энергия шығынын азайтады. Сонымен қатар, бұл әдіс жоғары тығыздықтағы және жақсартылған механикалық қасиеттері бар өнімдерді алуға мүмкіндік береді.

Механосинтез бен ұшқынды плазмалық қақтау үйлесімі бақыланатын қасиеттері бар Ni-Ti-Cu жүйесіне негізделген жоғары сапалы пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларын алуға мүмкіндік береді, соның ішінде: жоғары пішінді қалпына келтіру жылдамдығы, бақыланатын пішінді есте сақтау қабілеті, жоғары беріктік пен икемділік, коррозияға төзімділік, жақсартылған биоүйлесімділік.

Ұнтақты металлургия әдістері, әсіресе механосинтез бен ұшқынды плазмалық қақтау үйлесімінде, Ni-Ti-Cu жүйесіне негізделген жоғары сапалы пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды алудың жаңа мүмкіндіктерін ашады деп айтуға болады.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (№ AR22682739 – «NiTiCu жүйесі негізінде пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды өндіру 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

- Chekotu, J.C.; Groarke, R.; O'Toole, K.; Brabazon, D. Advances in Selective Laser Melting of Nitinol Shape Memory Alloy Part Production. *Materials* 2019, 12, 809. <https://doi.org/10.3390/ma12050809>
- S. Kumar Patel, B. Swain, R. Roshan et al. A brief review of shape memory effects and fabrication processes of NiTi shape memory alloys, *Materials Today: Proceedings* 2020, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.539>
- Kubášová, K.; Drátovská, V.; Losertová, M.; Salvetr, P.; Kopelent, M.; Koříněk, F.; Havlas, V.; Džugan, J.; Daniel, M. A Review on Additive Manufacturing Methods for NiTi Shape Memory Alloy Production. *Materials* 2024, 17, 1248. <https://doi.org/10.3390/ma17061248>
- Wen, S.; Gan, J.; Li, F.; Zhou, Y.; Yan, C.; Shi, Y. Research Status and Prospect of Additive Manufactured Nickel-Titanium Shape Memory Alloys. *Materials* 2021, 14, 4496. <https://doi.org/10.3390/ma14164496>
- Tang, D.; Hu, Y.; Yang, L. New Insights into the Mechanical Properties, Functional Fatigue, and Structural Fatigue of Ni-Ti Alloy Porous Structures. *Metals* 2023, 13, 931. <https://doi.org/10.3390/met13050931>
- Structure and phase composition of ferritic perlitic steel surface after electrolytic plasma quenching, *Russian Physics Journal*. – 2020. – Vol.63. – No.5. – P. 791-796. DOI:10.1007/s11182-020-02099-z, Popova N.A., Nikonenko E.L, Tabieva E.E., Uazyrkhanova G.K

- Influence of surface quenching on morphology and phase composition of ferritic-pearlitic steel, *Izvestiya Ferrous Metallurgy*. – 2020. – Volume 63. – No.11-12. – P. 915–921. DOI:0.17073/0368-0797-2020-11-12-915-921, Popova, N.A., Nikonenko, E.L., Tabieva E.E., Uazyrkhanova, G.K., Gromov, V.E.
- Studies about structural and thermal investigations on Ti₅₀Ni₃₀Cu₂₀ alloys obtained by different technological processes. – 2021. C.D. Cirstea, M. Lucaci, M. Valeanu, M. Sofronie, L.G. Bujoreanu, M.V. Lungu, V. Tsakiris, A. Cucos, D. Talpeanu, E. Enescu.
- Samal, S.; Molnárová, O.; Průša, F.; Kopeček, J.; Heller, L.; Šittner, P.; Škodová, M.; Abate, L.; Blanco, I. Net-Shape NiTi Shape Memory Alloy by Spark Plasma Sintering Method. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1802. <https://doi.org/10.3390/app11041802>
- Monogenov, A.N.; Marchenko, E.S.; Baigonakova, G.A.; Yasenchuk, Y.F.; Garin, A.S.; Volinsky, A.A. Improved mechanical properties of porous nitinol by aluminum alloying. *J. Alloy. Compd.* 2022, 918, 165617.
- Kaftaranova, M.; Hodorenko, V.; Anikeev, S.; Artyukhova, N.; Shabalina, A.V.; Gunther, V. Investigation of the Effect of Copper Addition on Physical and Mechanical Properties of TiNi-Cu Porous Alloy. *Metals* 2022, 12, 1696.
- Bewerse, C.; Emery, A.A.; Brinson, L.C.; Dunand, D.C. NiTi porous structure with 3D interconnected microchannels using steel wire spaceholders. *Mater. Sci. Eng. A* 2015, 634, 153–160.
- Bahador, Abdollah & Hamzah, Esah & Kondoh, Katsuyoshi & Abubakar, Tuty & Yusof, Farazila & Imai, Hisashi & Saud, Safaa & Ibrahim, Mustafa. (2017). Microstructure and Superelastic Properties of Free Forged Ti–Ni Shape-Memory Alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 28. 10.1016/S1003-6326(18)64683-7.
- Cirstea, C.D.; Povoden Karadeniz, E.; Cirstea, V.; Tolea, F.; Kozeschnik, E. Thermodynamic and Kinetic Simulations Used for the Study of the Influence of Precipitates on Thermophysical Properties in NiTiCu Alloys Obtained by Spark Plasma Sintering. *Nanomaterials* 2024, 14, 461. <https://doi.org/10.3390/nano14050461>
- Zhang Z, Liu Z, Lu J, Shen X, Science F. Direct the sintering mechanism in spark plasma sintering—Proof of the occurrence of spark discharge [J]. *Scr Mater*, 2014, 81: 56–59
- C. Velmurugan et al., Densification and microstructural evolution of spark plasma sintered NiTi shape memory alloy, *Advanced Powder Technology* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.06.026>

Information about authors

Sagymbekova Elfira Sagymbekkyzy – doctoral student, Center of Excellence VERITAS «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university» NJSK, Oskemen city, Kazakhstan, esagymbekova@edu.ektu.kz, +7-777-258-0606

Kozhakhmetov Yernat Abilkhayrovich – PhD, Center of Excellence VERITAS «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university» NJSK, Oskemen city, Kazakhstan, ykozhakhmetov@edu.ektu.kz, +7-775-131-6886

Aubakirova Danagul Mashanovna – «D. Serikbayev East Kazakhstan technical university» NJSK, Oskemen city, Kazakhstan, danagulbinom2023@gmail.com, +7-777-987-60-61

МАШИНА ЖАСАУ
МАШИНОСТРОЕНИЕ
MECHANICAL ENGINEERING

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_93
MFTAA 55.65.41

А.Х. Хамитбек¹, А.Е. Кайрбаева², М.Х. Бутабаев³, С.Ж. Оралбаев⁴, К.К. Мухамадиева⁵

Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан

¹E-mail: khamitbekov00@mail.ru*

²E-mail: erkenovna111@mail.ru

³E-mail: butabaevmir@mail.ru

⁴E-mail: 60sarsen@mail.ru

⁵E-mail: kalima.02@mail.ru

**БАЛҚАРАҒАЙ ЖАҢҒАҒЫНЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ЖҮКТЕМЕЛЕР КЕЗІНДЕ ҚАБЫҒЫНЫҢ
БҰЗЫЛУЫНА ЖӘНЕ ЯДРОНЫҢ САҚТАЛУЫНА ЫЛҒАЛДЫЛЫҚТЫҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ
НА РАЗРУШЕНИЕ СКОРЛУПЫ КЕДРОВОГО ОРЕХА И СОХРАННОСТЬ ЯДРА
ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗКАХ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF HUMIDITY
ON THE DESTRUCTION OF THE CEDAR NUT SHELL AND THE PRESERVATION
OF THE KERNEL UNDER MECHANICAL LOADS**

Аңдатпа. Бұл зерттеудің мақсаты – ядроның тұтастығын сақтауға баса назар аударып, балқарағай жаңғағының қабығының қысу және соққы жүктемелеріндегі механикалық қасиеттерін зерттеу. Жаңғақтарды өңдеу процесінде қабықтың тиімді бөлінуін қамтамасыз ету маңызды, сонымен бірге ядроның зақымдануын азайтады, өйткені ол жоғары тауарлық құндылықты білдіреді. Сынақтар қабықтың ылғалдылығының екі деңгейі (9 % және 13 %) бар балқарағай жаңғағының үлгілерінде жүргізілді, бұл ылғалдылықтың материалдың жүктеме әрекетіне әсерін бағалауға мүмкіндік берді.

Жұмыстың эксперименттік бөлігі қабықтың қысылу кезінде шағылуының шекті күшін және оны шағуға қажетті соққы энергиясын өлшеуді қамтыды. Ылғалдылығы 9 % болатын жаңғақтар сыну күшінің (85-90 Н) және соққы энергиясының (2.5-2.9 Дж) жоғары көрсеткіштерін көрсетті, бұл материалдың жоғары беріктігін көрсетеді. Ылғал үлгілер (13 %) статикалық және динамикалық жүктемелерге төзімділігі төмен болды, бұл ядроның зақымдану ықтималдығының жоғарылауымен бірге жүрді.

Бұл зерттеудің нәтижелері балқарағай жаңғағын өңдеумен айналысатын тамақ өнеркәсібі үшін өте маңызды. Қабықты өңдеуден бұрын оның ылғалдылық деңгейін бақылау ядроның зақымдану қаупін айтарлықтай төмендетуі мүмкін, бұл әсіресе өнімнің сапасы мен өндірістің экономикалық тиімділігін арттыру үшін маңызды. Ылғалдылығы 9 % жаңғақтар ядроның жақсы қорғанысын көрсетеді, бұл оларды автоматтандырылған өңдеу үшін қолайлы етеді.

Түйін сөздер: балқарағай жаңғағы, структурометр СТ-2, механикалық жүктемелер, ядро тұтастығы, ылғалдылық.

Аннотация. Целью данного исследования является изучение механических свойств скорлупы кедрового ореха при сжимающих и ударных нагрузках с упором на сохранение целостности ядра. Важно обеспечить эффективное разделение скорлупы в процессе обработки орехов, а также уменьшить повреждение ядра, поскольку это означает более высокую товарную ценность. Испытания проводились на образцах кедрового ореха с двумя уровнями влажности скорлупы (9 % и 13 %), что позволило оценить влияние влажности на нагрузочное действие материала.

Экспериментальная часть работы включала измерение предельной силы разрушения скорлупы при сжатии и энергии удара, необходимой для её разрушения. Орехи с влажностью 9 % демонстрировали высокие показатели предельной силы разрушения (85-90 Н) и энергии удара (2.5-2.9 Дж), что свидетельствует о более высокой прочности материала. Влажные образцы (13 %) проявляли меньшую устойчивость как к статическим, так и к динамическим нагрузкам, что сопровождалось повышенной вероятностью повреждения ядра.

Результаты данного исследования имеют важное значение для пищевой промышленности, занимающейся переработкой кедровых орехов. Контроль уровня влажности скорлупы перед её механической обработкой может существенно снизить риск повреждения ядра, что особенно важно для повышения качества продукции и экономической эффективности производства. Орехи с влажностью 9 % демонстрируют лучшую защиту ядра, что делает их более предпочтительными для автоматизированной переработки.

Ключевые слова: кедровый орех, структурометр СТ-2, механические нагрузки, целостность ядра, влажность

Abstract. The purpose of this study is to study the mechanical properties of the cedar nut shell under compressive and shock loads with an emphasis on maintaining the integrity of the core. It is important to ensure effective separation of the shell during the processing of nuts, as well as to reduce damage to the kernel, since this means a higher market value. The tests were carried out on samples of pine nuts with two levels of shell moisture (9% and 13%), which allowed us to assess the effect of humidity on the loading effect of the material.

The experimental part of the work included measuring the ultimate fracture force of the shell during compression and the impact energy required for its destruction. Nuts with a moisture content of 9% showed high indicators of the ultimate breaking force (85-90 N) and impact energy (2.5-2.9 J), which indicates a higher strength of the material. Wet samples (13%) showed less resistance to both static and dynamic loads, which was accompanied by an increased probability of core damage.

The results of this study are important for the food industry engaged in the processing of pine nuts. Controlling the moisture level of the shell before machining it can significantly reduce the risk of damage to the core, which is especially important for improving product quality and economic efficiency of production. Nuts with a moisture content of 9% demonstrate better core protection, which makes them more preferable for automated processing.

Keywords: cedar nut, ST-2 structurometer, mechanical loads, core integrity, humidity.

Kіpіcne. Балқарағай жаңғағы қоректік заттардың көзі ғана емес, сонымен қатар оның ядросының тұтастығын өңдеу және сақтау тұрғысынан зерттеу нысаны болып табылады. Қабықты ядроға зақым келтірместен тиімді және қауіпсіз бөлу процесі тамақ өнеркәсібінде өзекті мәселе болып табылады, өйткені ядроның тұтастығы оның тауарлық құндылығына тікелей әсер етеді. Бұл тапсырманың қиындығы – балқарағай жаңғағының қабығы өте берік, ал ядросы нәзік, механикалық жүктемелердің әсерінен оңай зақымдалады (Намитбек & Кайрбаева, 2024; Виаошэнг & Ян, 2022).

Балқарағай жаңғағын өңдеу кезінде жүктеменің екі негізгі түрі қолданылады: қысу және соққы. Олардың әрқайсысы қабық пен ядроға әртүрлі әсер етеді, ал қабықтың бұзылу механизмдерін түсіну ядроның зақымдануын азайтатын әдістерді жасауға көмектеседі. Қысу жаңғаққа әсер ететін жүктемені басқаруға мүмкіндік береді, бірақ күштің бір бөлігін ядроға беру қауіпі бар. Соққы әдістері қабықтың тез бөлінуінде тиімдірек болуы мүмкін, бірақ олар жоғары әсер ету энергиясына байланысты ядроның шағылу қаупін тудырады (Алмендрос & Мартін-Лара, 2015; Альтунтас & Озкан, 2008).

Бұл зерттеудің мақсаты – ядроның зақымдануын азайтуға баса назар аударатын, балқарағай жаңғағының қабығын қысу және соққы жүктемесі кезінде бөлуді зерттеу. Әртүрлі механикалық әсерлердегі қабықтың қасиеттерін талдау қабықтың ядроның тұтастығын сақтай отырып, тиімді бұзылатын оңтайлы жағдайларды анықтайды. Зерттеу тамақ өнеркәсібі үшін практикалық шешімдерді ұсынуға көмектесетін қысу күші, соққы энергиясы және қабықтың ылғалдылығының оның механикалық қасиеттеріне әсері сияқты әртүрлі параметрлерді қарастырады (Гладков, 2016; Хамитбек, Кайрбаева & Копылов, 2024; Cao et al., 2017; Bohnhoff, Lawson & Fischbach, 2019).

Жұмыс барысында алынған нәтижелер балқарағай жаңғағын өңдеудің жаңа әдістерін әзірлеу үшін, сондай-ақ жоғары беріктікті, тұрақтылықты және биожетімділікті біріктіретін материалдарды жасау үшін пайдаланылуы мүмкін. Сонымен қатар, бұл зерттеулер қалдықтарды азайту және тұрақты технологияларды дамыту бойынша жаһандық

тенденцияларға сәйкес келетін табиғи ресурстарды тиімдірек пайдалануға көмектеседі (Gupta & Das, 2000; Güner & Dursun, 2003).

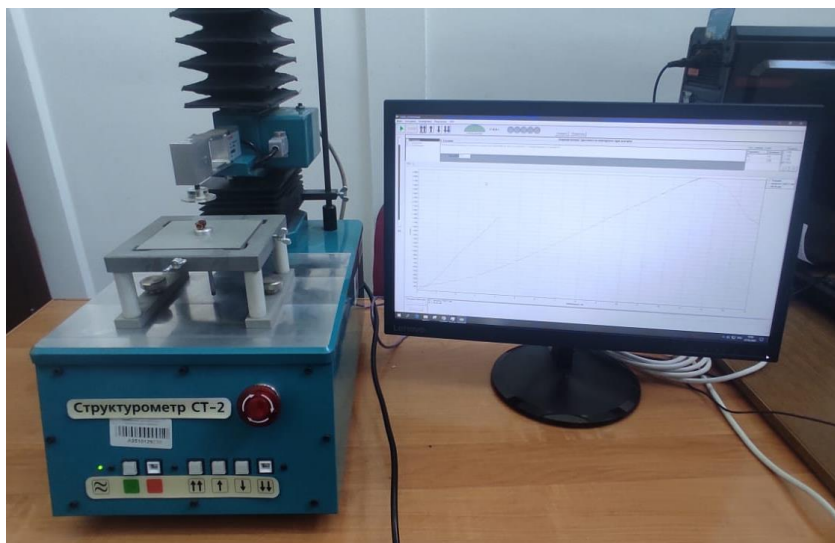
Материалдар мен әдістер. Бұл зерттеу үшін ядроның сақталуына ерекше назар аударатырып, олардың қабығының қысу және соққы жүктемелеріндегі қасиеттерін зерттеу мақсатында балқарағай жаңғағының үлгілері таңдалды. Материалдарды іріктеу кезінде бірнеше критерийлер болды (Хамитбек, 2024; Altuntas & Erko, 2010).

Алғашқы критерий өлшемі мен пішіні болды, ол диаметрі 8-10 мм, қабығының қалыңдығы бірдей балқарағай жаңғақтары қолданылды. Бұл эксперимент шарттарын стандарттауға және өлшемнің нәтижелерге әсерін болдырмауға мүмкіндік берді.

Келесі критерий тұтастығы, тәжірибелер үшін тұтас қабығы мен бүтін ядросы бар жаңғақтар ғана таңдалды. Сынақ нәтижелерін бұрмалайтын алдын ала ақаулы үлгілерді болдырмау үшін визуалды тексеру жүргізілді.

Келесі ылғалдылығы, яғни үлгілердің ылғалдылық деңгейіне ерекше назар аударылды. Жаңғақтар қабықтың ылғалдылығы 9 % және 13 % болатын екі топқа бөлінді. Бұл ылғалдылық деңгейлері оның қабықтың механикалық қасиеттеріне әсерін және ядроға зақым келтірместен тиімді ыдырау қабілетін бағалау үшін таңдалды. Жаңғақтар осы параметрлерге жету үшін ылғалдандырылды немесе кептірілді және сынақ жүргізілгенге дейін тұрақты температурада герметикалық контейнерлерде сақталды.

Эксперименттер жүргізу үшін құрылғы және стенд пайдаланылды. Структурометр СТ-2 жаңғақ үлгілеріне қысу жүктемесін жасауға арналған құрылғы (1-сурет). Бұл құрылғы қолданылатын күшті 0,1 Н дәлдікпен басқаруға мүмкіндік береді және қабықтың сыну сәтіне дейін қысымның біркелкі өсуін қамтамасыз етеді (Gavilán & Meriño-Gergichevich, 2024; Polat & Aydin, 2007; Zhao et al., 2011). Қолданылатын күш әр үлгі үшін одан әрі талдаумен бекітілді.



1-сурет. Структурометр СТ-2 қысу жүктемесін беретін құрылғы

Ескерту: автормен құрастырылған

Соққы күшін зерттеу стенді жаңғақтарға соққы жүктемесін жасау үшін арнайы стенд қолданылды (2-сурет). Стендте салмағы 30 және 40 грамм жүктер пайдаланылды, олар бекітілген биіктіктен жаңғақ қабығына тасталды. Қабықты шағу үшін қажетті соққы энергиясы өлшенді және сынақтан кейін ядроның күйі жазылды.



2-сурет. Соққы жүктемесін есептеуге арналған эксперименттік стенд
Ескерту – автормен құрастырылған

Соққы күшін сынау кезінде қабыққа құлаған кезде соққы энергиясына ауысатын жүктің потенциалдық энергиясын анықтау формуласы қолданылды (Козлова, 2019):

$$E = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

мұндағы: E – соққы энергиясы (Дж); m – жүктің салмағы (кг); g – ауырлық күшінің үдеуі ($9,81 \text{ м/с}^2$); h – жүктің құлау биіктігі (м).

Бұл формула қабықты бұзуға қажетті энергия мөлшерін есептеуге мүмкіндік береді.

Тәжірибелер әртүрлі биіктіктен құлаған салмағы 30 г және 40 г жүктермен жүргізілді. Осылайша, соққы энергиясының жоғарылауымен қабықтың қасиеттері қалай өзгеретінін бағалауға болады.

Алғашқысы қысу сынағы, ол әртүрлі ылғалдылық деңгейлері бар балқарағай жаңғағының қабығының беріктігін бағалау үшін сығымдау сынақтары жүргізілді.

Үлгілерді дайындау: ылғалдылығы 9 % және 13 % жаңғақ үлгілері СТ-2 структурометріне орналастырылды. Әрбір үлгі жүктемені қабықтың бүкіл бетіне біркелкі тарату үшін орнатылды. Жүктеме қолданбасы: жүктеме қабық сынғанға дейін біркелкі өсті. Шағылу сәтінде әрбір үлгі үшін шекті күш бекітілді. Тәжірибелерді қайталау: әрбір ылғалдылық деңгейі үшін қателерді азайту және шекті шағылу күшінің орташа мәндерін алу үшін 5 сынақ жүргізілді. Ядроның зақымдануын талдау: әр сынақтан кейін ядроны тексеру жүргізілді. Әрі қарай талдау үшін ядроның зақымдануы немесе болмауы тіркелді.

Балқарағай жаңғағының қабығының динамикалық жүктемелерге төтеп беру қабілетін бағалау үшін соққы сынақтары жүргізілді. Үлгілерді дайындау: жаңғақ үлгілері стендке қабықтың ортасында соққы болатындай етіп орналастырылды. Бұл соққы жүктемесінің біркелкі таралуын қамтамасыз етті. Соққы күшін қолдану: әр үлгіге салмағы 30 г және 40 г жүктер бекітілген биіктіктен тасталды. Қабықты шағу үшін қажетті соққы энергиясы бекітілді. Тәжірибелерді қайталау: әрбір ылғалдылық деңгейі үшін деректердің сенімділігін арттыру үшін 5 сынақ жүргізілді. Ядроның зақымдануын талдау: әр сынақтан кейін ядроның зақымдануын тексеру жүргізілді.

Ылғалдылығы төмен жаңғақтар (9 %) қысу және соққы жүктемелеріне үлкен қарсылық көрсетті. Төмен ылғалдылық жағдайында қабық қаттырақ және механикалық кернеуге төзімді болды. Сығымдау жүктемесінде ол үлкен сыну күшін көрсетті, бұл оның ылғалды үлгілермен салыстырғанда үлкен беріктігін көрсетеді. 9 % ылғалдылығы бар

қабық соққы энергиясын тиімдірек сіңірді, бұл соққы күшін сынау кезінде ядроның зақымдану ықтималдығын азайтты.

Ылғалдылығы жоғары жаңғақтар (13 %) механикалық әсерге төзімділігі төмен болды. Қабық 13 % ылғалдылықта иілгіш болды және қысу күшінің әсерінен тезірек деформацияланды. Мұндай үлгілер үшін сынудың шекті күші ылғалдылығы 9 % болатын үлгілерге қарағанда төмен болды. Соққы жүктемесі жағдайында мұндай үлгілер ядроларға жиі зақым келтірді, өйткені жұмсақ қабық энергияның көп бөлігін ішкі ядроға берді, бұл оның бұзылу қаупін арттырды.

Нәтижелер және оларды талқылау. Балқарағай жаңғағының қабығының әртүрлі ылғалдылықтағы қысу және соққы жүктемесіндегі қасиеттерін зерттеу оның механикалық қасиеттерін түсіну үшін маңызды заңдылықтарды анықтады. Бұл бөлімде жүргізілген сынақтардың нәтижелері, сондай-ақ ылғалдылықтың ядроға зақым келтірместен қабықты жару үшін қажетті сынудың шекті күшіне және соққы энергиясына әсері туралы талқылау берілген.

Сығымдау сынақтарының нәтижелері 1-кестеде көрсетілген. Кестеде екі ылғалдылық деңгейі (9 % және 13 %) бар бес үлгі үшін қабықтың сынуының шекті күші туралы деректер бар, сонымен қатар ядроның зақымдануы бар-жоғы көрсетілген.

1-кесте. Сығымдау сынақтарының нәтижелері

Эксперимент нөмірі	Ылғалдылық (%)	Үлгі №	Шағылудың шекті күші, (Н)	Ядроның зақымдануы
1	9	1	85	Жоқ
2	9	2	87	Иә
3	9	3	89	Жоқ
4	9	4	90	Жоқ
5	9	5	88	Иә
6	13	1	75	Жоқ
7	13	2	77	Жоқ
8	13	3	76	Иә
9	13	4	78	Жоқ
10	13	5	74	Иә

Ескерту – автормен құрастырылған

Соққы күшін сынау нәтижелері 2-кестеде көрсетілген. Бұл кестеде жүктің массасын, соққы энергиясын және ядроның зақымдануы туралы ақпаратты қоса алғанда, бес үлгінің нәтижелері берілген.

2-кесте. Соққы күшін сынау нәтижелері

Эксперимент нөмірі	Ылғалдылық (%)	Үлгі №	Жүктің салмағы (г)	Соққы энергиясы (Дж)	Ядроның зақымдануы
1	9	1	30	2,5	Иә
2	9	2	40	2,8	Иә
3	9	3	30	2,6	Жоқ
4	9	4	40	2,9	Иә
5	9	5	30	2,7	Жоқ
6	13	1	30	1,4	Жоқ
7	13	2	40	1,6	Жоқ
8	13	3	30	1,5	Жоқ
9	13	4	40	1,7	Жоқ
10	13	5	30	1,5	Иә

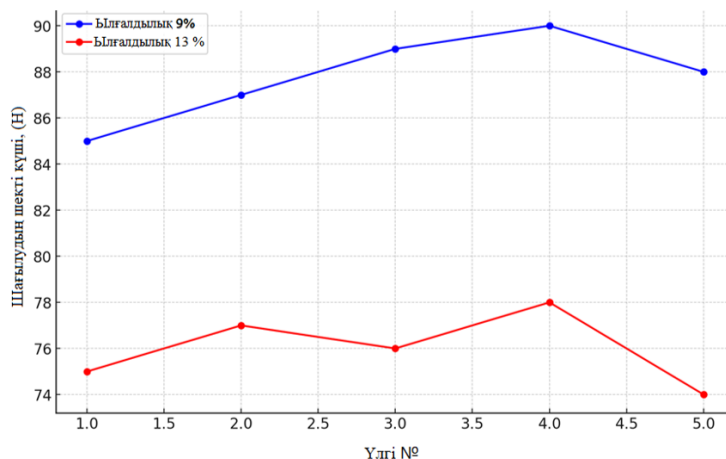
Ескерту – автормен құрастырылған

Сығымдау сынақтарында келесі тәуелділік тіркелді (3-сурет):

– 9 % ылғалдылығы бар жаңғақтар шағылудың жоғары шекті күшін көрсетті (85 Н-ден 90 Н-ға дейін). Ылғалдылығы төмен қабық қысылуға төзімді болып шықты, бұл оның қаттылығы мен деформацияға төзімділігіне байланысты.

– 13 % ылғалдылығы бар жаңғақтар аз төзімді болып шықты, сынудың шекті күші 74 Н-ден 78 Н-ге дейін өзгерді.

– 9 % ылғалдылықтағы қабық қаттырақ және қаттырақ құрылымға ие, бұл оған үлкен жүктемелерге сынбай төтеп беруге мүмкіндік береді. 13 % ылғалдылығы бар үлгілердегі ылғал талшықтар арасындағы байланыстарды әлсіретеді, бұл сынудың шекті күшін азайтады. Ылғалдылықтың жоғарылауы қабықтың статикалық жүктемелерге төзімділігін төмендетеді, бұл оны қайта өңдеу кезінде тезірек шағуға әкелуі мүмкін.



3-сурет. Сығымдау сынағы нәтижелерінің графигі

Ескерту – автормен құрастырылған

Соққы күшін сынау кезінде келесі тәуелділік байқалды (4-сурет):

– 9 % ылғалдылығы бар жаңғақтар да соққыға төзімділікті көрсетті. Қабықты шағу үшін қажетті соққы энергиясы 2,5 Дж-ден 2,9 Дж-ға дейін болды.

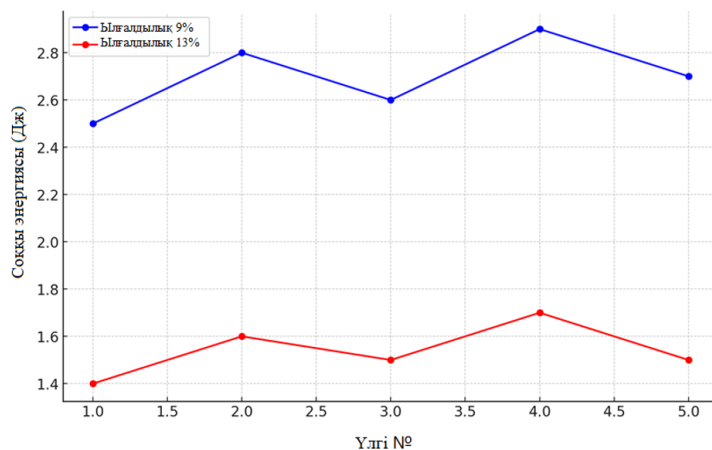
– 13 % ылғалдылығы бар жаңғақтар соққы энергиясының төмен мәндерін көрсетті – 1,4 Дж-ден 1,7 Дж-ге дейін, бұл қабықтың динамикалық жүктемелерді ұстап тұру қабілетінің төмендігін көрсетеді.

Құрғақ қабық (9 % ылғалдылық) күштірек және соққыға төзімді болып шықты. Төмен ылғалдылықта қабық соққы энергиясын жақсы сіңіреді және таратады, бұл оған үлкен соққыларға тез арада жойылмай төтеп беруге мүмкіндік береді. 13 % ылғалдылығы бар үлгілер жағдайында ылғал қабықтың ішкі байланыстарын әлсіретеді, бұл оны соққы кезінде сынғыш сынуға бейім етеді. Бұл механикалық өңдеу кезінде ядроға зақым келтіруі мүмкін, бұл өнеркәсіпте өте қажет емес.

Зерттеудің маңызды аспектісі қабықтың сынуы кезінде ядроның тұтастығын сақтау болды. нәтижелер көрсетті:

– 9 % ылғалдылықта жаңғақ ядросы қысу кезінде де, соққы кезінде де өзгеріссіз қалды. Қатты қабық жүктеменің негізгі бөлігін қабылдай отырып, ядроны тиімді қорғады.

– 13 % ылғалдылықта көп жағдайда ядро зақымдалды. Себебі жұмсақ және икемді қабық тезірек ыдырап, жүктеменің бір бөлігін ядроға өткізіп, оның деформациясына немесе зақымдалуына әкелді.



4-сурет. Соққы күшін сынау нәтижелерінің графигі

Ескерту – автормен құрастырылған

Жаңғақтарды механикалық өңдеуден бұрын ылғалдылық деңгейін бақылау ядролардың зақымдануын азайтуда шешуші рөл атқаруы мүмкін. 9 % ылғалдылығы бар үлгілер қабықтың беріктігінің арқасында ядроны жақсы қорғайды. Ылғал жаңғақтар ядролардың зақымдану қаупін азайту үшін мұқият өңдеуді қажет етеді.

9 % ылғалдылықтағы балқарағай жаңғағының қабығы қысу кезінде де, соққы кезінде де жақсы нәтиже көрсетті. Ол 13 % ылғалдылығы бар үлгілерге қарағанда тұрақты және өзегін жақсы қорғады. Себебі төмен ылғалдылық материалдың қаттылығын сақтауға көмектеседі, бұл оны деформацияға бейім етеді.

Қысу жүктемелерінде қабықтың бұзылуы біртіндеп жүреді, бұл ядроның қауіпсіздігін сақтауға мүмкіндік береді. Соққы жүктемелерінде, әсіресе жоғары ылғалдылықта, ыдырау тезірек жүреді, бұл ядроның зақымдану ықтималдығын арттырады (Fan & Zhang, 2023).

Бұл зерттеудің нәтижелері балқарағай жаңғағын өңдеумен айналысатын тамақ өнеркәсібі үшін маңызды практикалық мәнге ие. Өңдеу алдында қабықтың ылғалдылығын бақылау ядроның зақымдану ықтималдығын айтарлықтай төмендетіп, өңдеу процестерінің тиімділігін арттыруы мүмкін.

Қорытынды. 9 % ылғалдылығы бар жаңғақтар 13 % ылғалдылық үлгілерімен салыстырғанда қысу және соққы жүктемелеріне жоғары төзімділікті көрсетеді. Қабықтың ылғалдылығын 9 %-ға дейін төмендету ядроның зақымдануын азайтуға мүмкіндік береді, бұл өнімнің сапасын жақсарту үшін маңызды. Жаңғақтарды өңдеуден бұрын ылғалдылықты бақылау өндірістік процестердің тиімділігін едәуір арттырып, зақымдалған ядролардың пайызын төмендетуі мүмкін.

Бұл нәтижелер тамақ өнеркәсібіндегі технологиялық процестерді оңтайландыру үшін, сондай-ақ жаңғақтар мен басқа да азық-түлік өнімдерін механикалық өңдеу бойынша қосымша зерттеулер жүргізу үшін пайдаланылуы мүмкін.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс. Бұл зерттеуді жасауға атсалысқан Алматы технологиялық университетінің «Өндірістік үдерістердің машиналары және аппараттары» кафедрасының ұжымына алғысымызды білдіреміз.

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

Әдебиеттер тізімі

- Hamitbek A., Kairbaeva A. (2024). Experimental studies for the Development of special equipment for cleaning cedar nuts from the shell. *Kompleksnoe Ispolzovanie Mineralnogo Syra = Complex Use of Mineral Resources*, 333(2), 34-40. <https://doi.org/10.31643/2025/6445.15>
- Козлова Н.А. (2019). «Влияние влажности ореха на процесс его разрушения» Молодой ученый, 51, 83-86 // Kozlova, N.A. (2019). "Vliyaniye vlazhnosti orekha na process ego razrusheniya." *Molodoy uchenyj*, 51, 83-86.
- Гладков В.П. (2016). «Влияние условий хранения на сохранность орехов». Хранение и переработка сельхозпродукции, 5(3), 37-43. // Gladkov, V.P. (2016). "Vliyaniye uslovij hraneniya na sohrannost' orekhov." *Hraneniye i pererabotka sel'hozprodukcii*, 5(3), 37-43.
- Almendros A.I., Martín-Lara M.A. (2015) Physico-chemical characterization of pine cone shell and its use as biosorbent and fuel. *Bioresource Technology*; 196:406-412. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.-2015.07.109>
- Biaosheng H., Jiang L. (2022) Applications of machine learning in pine nuts classification. *Scientific Reports*; 8799. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12754-9>
- Хамитбек А.Х., Кайрбаева А.Е., Копылов М.В. (2024) Эксперименттік зерттеулер нәтижесінде балқарағай жаңғағының қабығын шағу күшін анықтау. – No 1, 2024 «ШҚТУ ХАБАРШЫСЫ», 278-288 б. // Hamitbek A.H., Kairbaeva A.E., Kopylov M.V. (2024) Eksperimenttik zertteuler nәtijesinde balqaraғai jaңғағaynyñ qabyғyn шағu күşin anyқтаu. – No 1, 2024 «ŞQTU HABARŞYSY». – 278-288 b.
- Altuntas E., & Ozkan Y. (2008). "The Effects of Moisture Content, Compression Speeds, and Axes on Mechanical Properties of Walnut Cultivars." *Food and Bioprocess Technology*, 4(7), 1288–1295.
- Cao C. M., Sun S., Ding R., Li B., & Wang S. (2017). "Experimental Study on Mechanical Characteristics of Nut Rupturing under Impact Loading." *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(1), 53-60.
- Bohnhoff D.R., Lawson K.S., & Fischbach J.A. (2019). "Recent Studies in Mechanical Properties of Selected Hard-Shelled Seeds: A Review." *JOM*, 62(5), 1087-1095.
- Gupta R.K., & Das S.K. (2000). "Fractural Resistance of Sunflower Seed and Kernel to Compressive Loading." *Journal of Food Engineering*, 46, 1-8.
- Güner M., Dursun E., & Dursun I. G. (2003). "Mechanical Behavior of Hazelnut Under Compression Loading." *Biosystems Engineering*, 85(4), 485-491.
- Polat B., & Aydin C. (2007). "Some Physical and Mechanical Properties of Pistachio Nut." *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 13, 237-246.
- Fan X., & Zhang Y. (2023). "Determination of Critical Moisture Content Facing Walnut Shell Breaking and Optimization of Combined Hot Air and Microwave Vacuum Drying Process." *Applied Sciences*, 13(24), 13287.
- Gavilán G., & Meriño-Gergichevich C. (2024). "Hazelnut and Walnut Nutshell Features as Emerging Added-Value Byproducts of the Nut Industry: A Review." *Plants*, 13(7), 1034.
- Altuntas E., & Erkol M. (2010). "The Effects of Moisture Content on Mechanical Properties of Walnut Shell." *Czech Journal of Food Sciences*, 28(6), 547-555.
- Хамитбек А.Х. (2024) Балқарағай жаңғағының ылғалдылығының шағылу күшіне әсерін анықтау [Мәтін] / А.Х. Хамитбек, А.Е. Кайрбаева, М.В. Копылов // Механика және технологиялар / Ғылыми журнал. – №2(84). – Б. 9-22. <https://doi.org/10.55956/RQQT4151> // Hamitbek, A.H. (2024) Balqaraғai jaңғағaynyñ yлғaldylyғynyñ шағyлу күşine әserin anyқтаu [Mәtin] / A.H. Hamitbek, A.E. Kairbaeva, M.V. Kopylov // Mehanika және tehnologialar / Ғylymi jurnal. – №2(84). – Б. 9-22.
- Zhao S.G., Zhao Y.P., Wang H.X., Gao Y., Zhang Z.H., & Feng D.L. (2011). "Factors Affecting Nutshell Structure of Walnut." *Scientia Silvae Sinicae*, 47(4), 70-75.

Information about authors

Khamitbek Ayat Khayyrzhanovich – Master of Technical Sciences, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, khamitbekov00@mail.ru, ORCID:0000-0003-2321-7686, +7 747 573 56 96

Kairbaeva Ainura Erkenovna – PhD, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, erkenovna111@mail.ru, ORCID: 0000-0002-9578-7795

Butabaev Mir Haliullaevich – Master of Technical Sciences, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, butabaevmir@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4927-6318

Oralbaev Sarsembek Zhumataevich – c.t.s., Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, 60sarsen@mail.ru, ORCID: 0000-0002-4508-432X

Muhamadieva Kalima Kurmankanovna – Master of Technical Sciences, Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan, kalima.02@mail.ru, ORCID: 0000-0002-0336-9167

МАТЕРИАЛТАНУ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ
MATERIALS SCIENCE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_101
MPHTI 29.19.16

В.М. Юров¹, К.Н. Жангозин¹, Т.К. Жанабергенов¹, Д.Б. Каргин²

¹ТОО «ТСК-Восток», Астана, г. Караганда, Казахстан

E-mail: exciton@list.ru*

E-mail: 4kzh@mail.ru

E-mail: 4tkz@bk.ru

²НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева», г. Астана, Казахстан

E-mail: kargin_db@enu.kz

**К ВОПРОСУ О КОРОБЛЕНИИ ГРАФЕНОВЫХ ЛИСТОВ
ГРАФЕН ПАРАҚТАРЫНЫҢ ОРАЛУ МӘСЕЛЕСІ ТУРАЛЫ
TO THE QUESTION OF WARPING OF GRAPHENE SHEETS**

Аннотация. В статье анализируется вопрос о короблении листов графена в подвешенном состоянии. Были предложены различные механизмы образования гофр, морщин и складок на листах графена. Предложена новая модель коробления графена. Суть ее заключается в том, что графен получается в большинстве случаев из графита, где присутствуют значительные внутренние напряжения, а в нанослое графита меняются все физические (тепловые и т.д.) и химические (адсорбция и т. д.) параметры графена.

Ключевые слова: графит; графен; нанослой; мезослой; коробление.

Аңдатпа. Мақалада тоқтатылған күйдегі графен парақтарының деформациялану мәселесі талданады. Графен парақтарында гофр, әжімдер және қатпарлардың пайда болуының әртүрлі механизмдері ұсынылды. Графеннің тоқырауының жаңа моделі ұсынылды. Оның мәні мынада: графен көп жағдайда айтарлықтай ішкі кернеулер болатын графиттен алынады, ал графит наноқабатында графеннің барлық физикалық (термиялық және т.б.) және химиялық (адсорбциялық және т.б.) параметрлері болады. өзгерту.

Түйін сөздер: графит; графен; наноқабат; мезоқабат; деформация.

Abstract. The article analyzes the issue of warping of graphene sheets in a suspended state. Various mechanisms for the formation of corrugations, wrinkles and folds on graphene sheets have been proposed. A new model of graphene warping has been proposed. Its essence lies in the fact that graphene is obtained, in most cases, from graphite, where significant internal stresses are present, and in the graphite nanolayer all physical (thermal, etc.) and chemical (adsorption, etc.) parameters of graphene change.

Keywords: graphite; graphene; nanolayer; mesolayer; warping.

Введение. Графен, открытый 20 лет назад (Novoselov K.S. et al., 2004; Новоселов К.С., 2011), представляет собой удивительный материал, применяемый в различных областях человеческой деятельности (рис. 1) (Баимова Ю.А. и др., 2018; Zhang T., 2022; Gupta R.K., 2023). На сегодня мировой рынок графена только формируется (рис. 2, а) и представлен компаниями в различных странах (рис. 2, б), где лидерство занимают Китай и США. Методы получения графена довольно разнообразны. Обзор их проведен в работах (Новоселов К.С., 2011; Баимова Ю.А. и др., 2018; Zhang T., 2022; Gupta R.K., 2023). В работах (Жангозин К.Н. и др., 2021; Юров В.М., Жангозин К.Н. и др., 2024) предложена оригинальная инновационная методика для получения графена микрокластерной водой в сочетании с ультразвуком и электрическим полем. Однако получить графен большого размера не удастся из-за коробления листов графена.

Целью настоящей статьи является рассмотрение предыдущих работ по короблению графена и предложение своего механизма развития этого процесса.

Обзор предыдущих работ. В работе (Meyer J.C. et al., 2007) исследованы отдельные листы графена, свободно подвешенные на микрокаркасе в вакууме или воздухе. Результаты демонстрируют коробление, поверхностную шероховатость, а деформации вне плоскости достигают 1 нм.

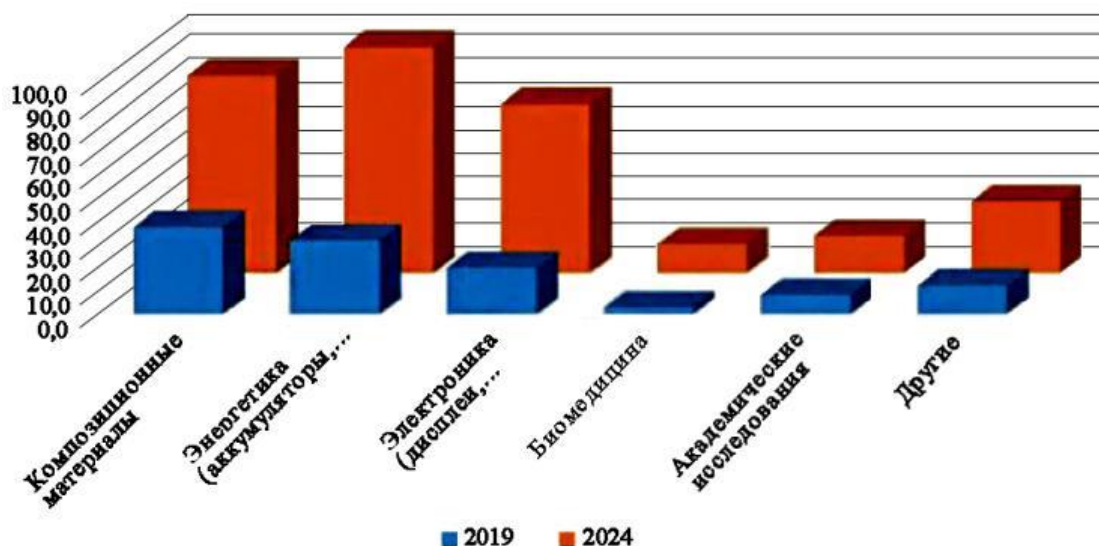


Рисунок 1. Потребление графена в зависимости от сферы применения в 2019 и 2024 годах (\$ млн)

Примечание – на основе (Гаршев А.В., 2019)

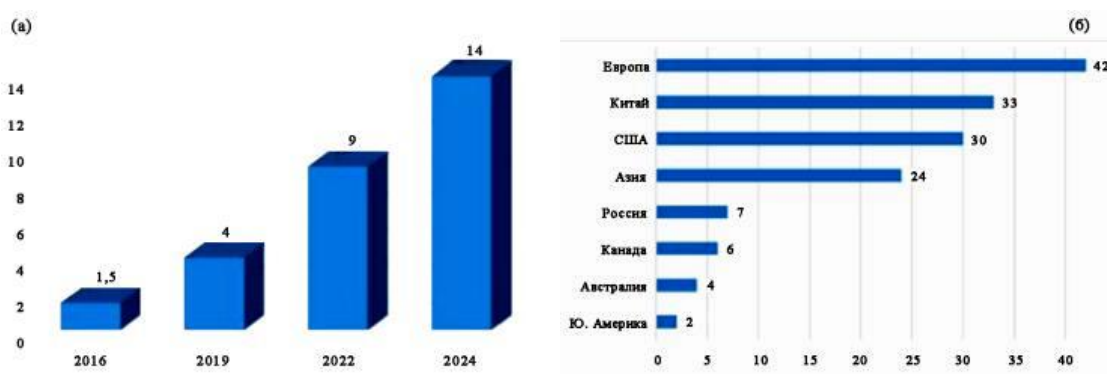


Рисунок 2. Мировое производство графена в 2016-2024 годах, тысяч тонн (а); страны, где производят графен, компании, штук (б)

Примечание – на основе (Гаршев А.В., 2019)

На рисунке 3, а показано светлорольное изображение ПЭМ подвешенной графеновой мембраны. Ее центральная часть (однородная и невыразительная область, обозначенная стрелками) представляет собой монослойный графен. Электронно-дифракционные изображения с разных участков чешуйки показывают, что это монокристалл без доменов. В работе отмечаются прокрученные верхние и нижние края графена. Отмечается

коробление (возникновение эластичных гофр) листов графена, которое связывается с высокой подвижностью носителей заряда в графене. Теоретический расчет этого коробления листов графена с помощью метода Монте-Карло показал (Fasolino A. et al., 2007), что рябь (гофры) (рис. 3, б) появляется из-за тепловых флуктуаций с распределением по размерам около 80 \AA , что совместимо с выводами ($50\text{-}100 \text{ \AA}$) работы (Meyer J.C. et al., 2007).

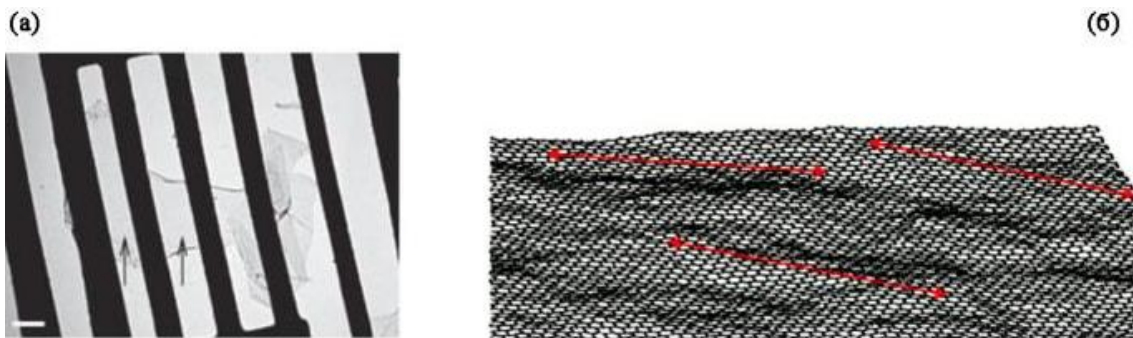


Рисунок 3. Подвешенная графеновая мембрана (а) (Meyer J.C. et al., 2007); конфигурация образца $N = 8640$ при $T = 300 \text{ K}$. Красные стрелки имеют длину $\sim 80 \text{ \AA}$ (б)
Примечание – на основе (Fasolino A. et al., 2007)

Однако выводы работы (Fasolino A. et al., 2007) были подвергнуты критике в работе (Shenoy V.V. et al., 2008), где теоретически было показано, что краевые напряжения вносят внутреннюю рябь (коробление) в отдельно стоящие графеновые листы (Meyer J.C. et al., 2007) даже при отсутствии каких-либо тепловых эффектов (рис. 4).

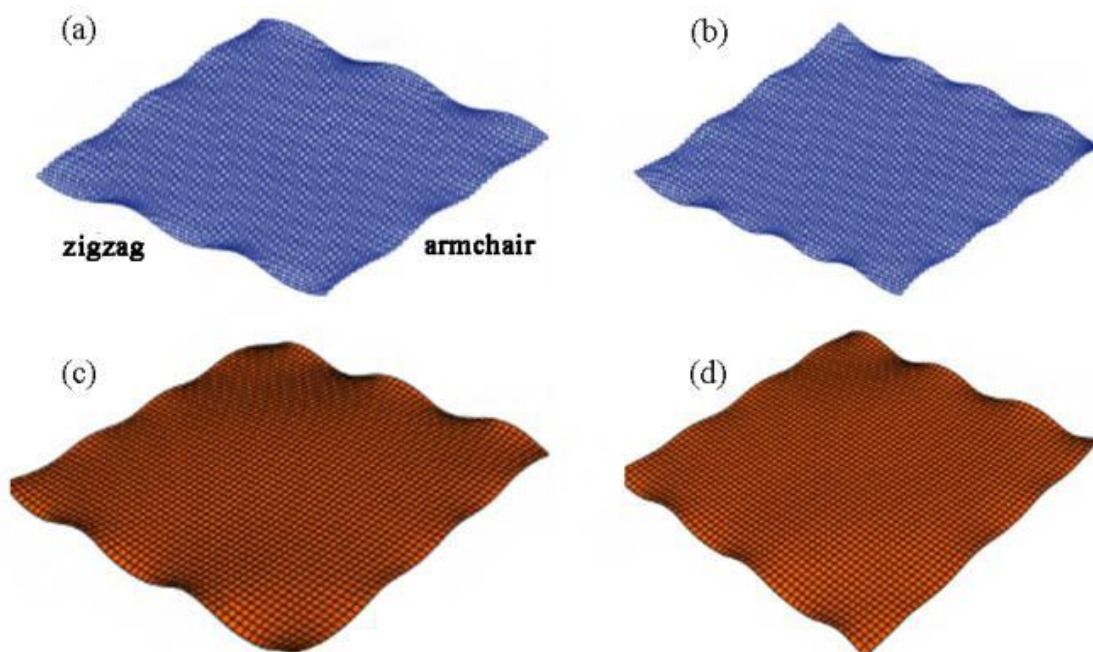


Рисунок 4. Формы деформированных листов графена
Примечание – на основе (Shenoy V.V. et al., 2008)

В обзоре (Deng S., Berry V., 2016) описываются различные механизмы образования морщин, ряби и складок (рис. 5), а также взаимодействие между атрибутами морщин и ряби (длина волны/ширина, амплитуда/высота, длина/размер и радиус изгиба) и электронными свойствами графена и другими механическими, оптическими, поверхностными и химическими свойствами.

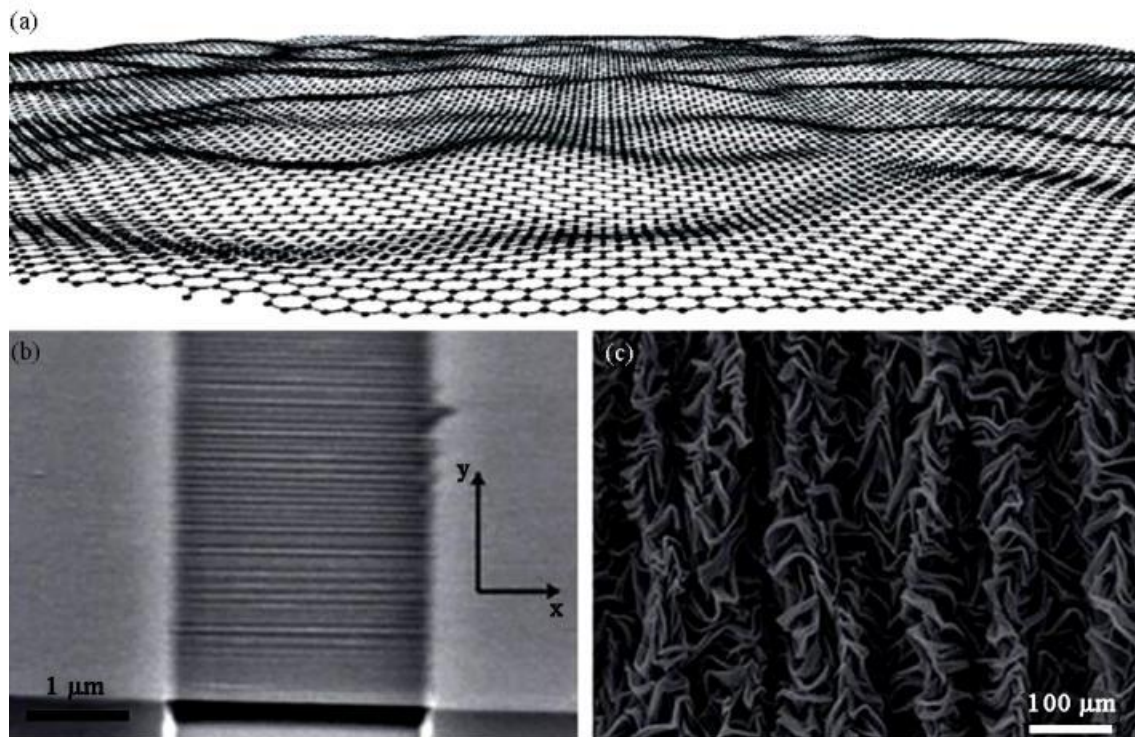


Рисунок 5. Гофрированный (а); сморщенный (b) и смятый (с) графен

Примечание – на основе (Deng S., Berry V., 2016)

В обзоре (Deng S., Berry V., 2016) описаны различные механизмы образования морщин, ряби и складок в графене, такие как (а) – тепловые колебания двумерной решетки, (b) – краевая нестабильность, дефекты и дислокации, (с) – отрицательное тепловое расширение (в отличие от положительного теплового расширения для подложки); (d) – испарение/удаление захваченного растворителя, (e) – релаксация предварительно напряженной подложки, (f) – закрепление на подложке, (g) – поверхностный потенциал подложки и (h) – поверхностное натяжение растворителя.

Деформация графена регулируется его механическими свойствами (модулем Юнга, межфазной энергией и числом слоев), а возникающие гофры изменяют его электронную структуру (раскрытие запрещенной зоны (потенциально > 1 эВ), псевдомагнитное поле в бислоях, образование электронно-дырочных луж и транспорт носителей заряда). Они, в свою очередь, могут быть использованы для изменения смачиваемости графена, пропускания, химического потенциала, расширения для хранения энергии и проводимости. В недалеком будущем важно: (а) обеспечить контроль физических свойств этих гофр; (b) тщательно изучить влияние складок на электронные, оптические, механические и химические свойства и (в) изучить эти эффекты на других двумерных наноматериалах.

В работе (Qin H. et al., 2017) проведено моделирование молекулярной динамики (МД) для изучения влияния ряби на коэффициент Пуассона графена. Из-за толщины графена в атомном масштабе внеплоскостные ряби генерируются в свободно стоящем графене с топологическими дефектами (например, семиугольниками и пятиугольниками) для высвобождения энергии деформации в плоскости. С помощью моделирования МД обнаружено, что коэффициент Пуассона рябого графена уменьшается при увеличении его соотношения сторон η (амплитуда по длине волны). Для рябого листа графена $\eta = 0,188$ наблюдается отрицательный коэффициент Пуассона = 0,38 для деформации растяжения до 8%, тогда как коэффициент Пуассона для $\eta = 0,066$ почти равен нулю. При одноосном растяжении рябь постепенно становится плоской, поэтому коэффициент Пуассона рябого графена определяется конкурирующими факторами собственного положительного коэффициента Пуассона графена и отрицательного коэффициента Пуассона из-за эффекта разглаживания морщин. Кроме того, рябой графен демонстрирует превосходную прочность на разрыв и ударную вязкость. Благодаря сочетанию его акустических и превосходных механических свойств рябой графен может обладать потенциалом для применения в наноразмерных устройствах и наноматериалах. Иллюстрации пяти гофрированных листов графена показаны на рис. 6.

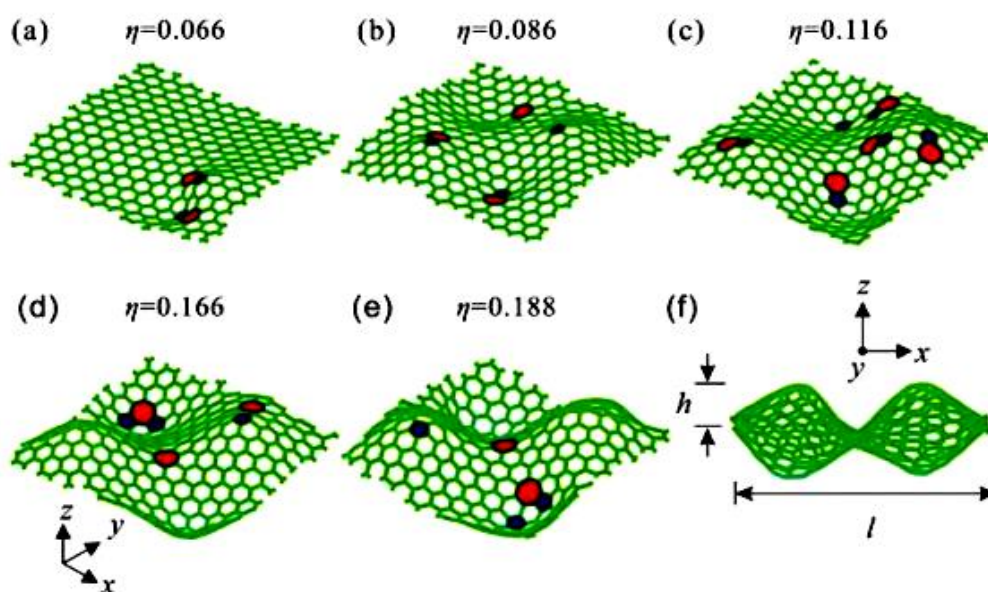


Рисунок 6. Иллюстрации пяти гофрированных листов графена с соотношениями сторон $\eta = (h/l) = 0,066$ (a), $\eta = 0,086$ (b), $\eta = 0,116$ (c), $\eta = 0,166$ (d), $\eta = 0,188$ (e)

Примечание – на основе (Qin H. et al., 2017)

На рис. 6 семиугольные и пятиугольные дефекты отмечены красным и синим цветами. (f) Боковой вид $\eta = 0,188$, где h – амплитуда, а l – длина волны.

Отметим последнюю работу (Ахунова А.Х., Баимова Ю.А., 2023) по графену по подобному вопросу. При помощи метода МД проанализированы особенности деформационного поведения и процесс разрушения графена, содержащего дислокационные диполи с различным плечом. Учтено коробление графена в процессе деформации, что сильно понижает его прочность.

Установлено, что механические свойства графена, содержащего дислокационные диполи, слабо зависят от температуры по сравнению с графеном, который не содержит

дефекты либо содержит дефекты Стоуна-Уэлса. Показано, что изменение расстояния между дислокациями в диполе не оказывает заметного влияния на модуль упругости и прочность графена, однако наличие дислокационных диполей может влиять на коробление графена в процессе растяжения.

Наша модель

В основе нашей модели лежит работа (Юров В.М., 2019). Начнем с графита, который является аллотропной модификацией углерода (рис. 7, а). Если отщепить у графита один монослой, то получается графен (рис. 7, б).

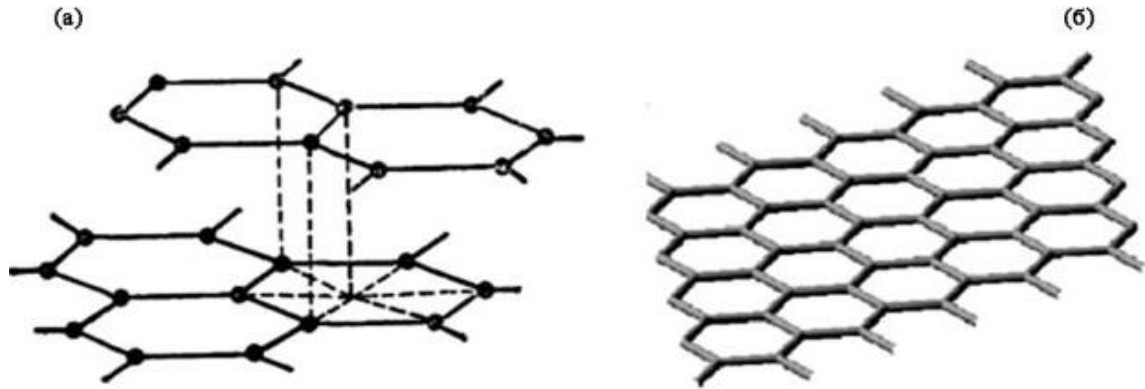


Рисунок 7. Кристаллическая структура графита (а) и графена (б)

Примечание – составлено авторами

Толщину слоя поверхности R(I) графита определим по эмпирической формуле, приведенной в работах (Юров В.М., 2019; Yurov V., Zhangozin K., 2024):

$$R(I) = \alpha \cdot \frac{V}{S} \quad (1)$$

Модель графита представлена на рис. 8, а. Толщина поверхностного слоя R(I), определяемая формулой (1), показывает, что она зависит от молярного объема кристалла – $v = M/\rho$, M – молярная масса (кг/моль), ρ – плотность (кг/м³), от площади $S = 1 \text{ м}^2$ и коэффициента $\alpha = 0,17 \cdot 10^{-9} \text{ моль}^{-1} = \text{const}$. Молярный объем элемента изменяется с зарядовым числом Z в табл. Менделеева Д.И. (рис. 8, б).

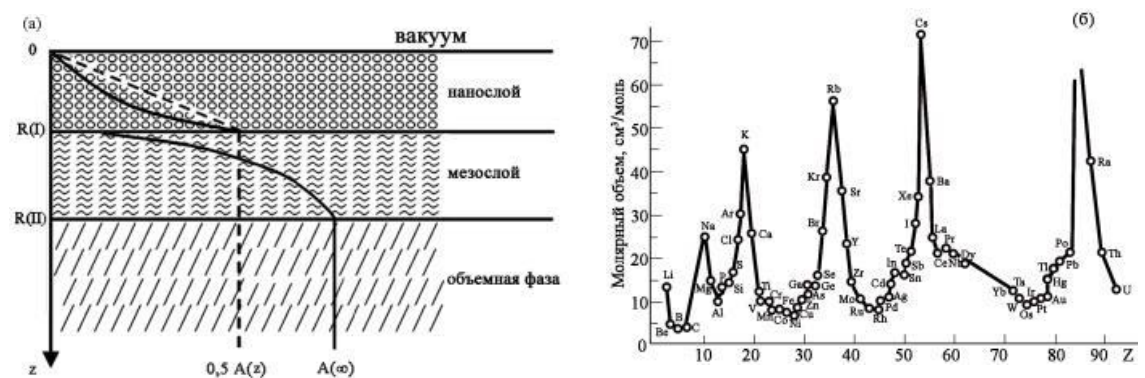


Рисунок 8. Модель графита (а); атомный объем в таблице Менделеева Д.И. (б)

Примечание – составлено авторами

Толщина поверхностного слоя графита и графена приведена в табл. 1.

В табл. 1: T_m – температура плавления; γ – величина поверхностной энергии в направлении а и с.

Таблица 1. Толщина поверхностного слоя графита и графена

Углерод	ρ , кг/м ³	T_m , К	$R(I)_a$, нм	$R(I)_c$, нм	γ_a , Дж/м ²	γ_c , Дж/м ²
Графит	2260	3970	0,90 (3)	2,46 (3)	2,779	0,591
Графен	2230	4510	0,246 (1)	0,14 (1)	3,157	-

Примечание – составлено авторами

Поверхностная энергия кристалла γ_2 равна (Рехвиашвили С.Ш. и др., 2007):

$$\gamma_2 = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot T_m [\text{Å} \cdot \text{Å}^{-2}]. \quad (2)$$

В уравнении (2) введено обозначение T_m , которое означает температуру плавления кристалла в кельвинах. Здесь также нужно учитывать в слое $R(I)$ размерный эффект, так что вместо γ_2 мы получаем γ_1 (Юров В.М., Гончаренко В.И. & Олешко В.С., 2023):

$$\gamma_1 = \gamma_2 (1 - R(I) / R(I) + h) \approx 0,5 \gamma_2. \quad (3)$$

В уравнении (3) величину γ_{12} считают равной нулю. Чтобы сместить фазу γ_1 относительно фазы γ_2 , нужно затратить энергию адгезии (Зимон А.Д., 1977):

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \approx \gamma_1 + \gamma_2. \quad (4)$$

Из-за релаксации или реконструкции поверхности кристалла возникают напряжения между фазами γ_1 и γ_2 , которые определяются соотношением (Зимон А.Д., 1977):

$$\sigma_{is} = \sqrt{W_a \cdot \text{Å} / R(I)}, \quad (5)$$

Здесь E представляет модуль Юнга. Из формул (1) – (5) определяем энергетические параметры исходных величин и представляем их в табл. 2. Добавим к этому, что деформация графена даже около 10% приводит к его короблению (Катин К.П., 2020).

Таблица 2. Энергетические и упругие свойства графена и графита

Углерод	W_{aa} , мДж/м ²	W_{ac} , мДж/м ²	σ_{isa} , МПа	σ_{isc} , МПа	E_a , ГПа	E_c , ГПа
Графит	2853	1690	4900	136	7,59	3,48
Графен	3448	-	118400		1000	-

Примечание – составлено авторами

Из табл. 2 вытекает, что большие напряжения σ_{is} в графене однозначно приводят к появлению гофр (морщин) на его поверхности. Иными словами, происходит коробление листов графена без прикладывания стороннего напряжения.

Коробление поверхности графена за счет внутренних напряжений приводится в работе (Голоудина С.И. и др., 2019). Там показано АСМ-изображение поверхности графена, из которого видно, что поверхность состоит из доменов размером (20×50) нм, ориентированных в одном направлении и образующих «складки» на поверхности графена высотой 1 нм. Шероховатость на площади (0,5×0,5) мкм составляет $R_a = 0.25$ нм.

В табл. 1 в скобках дано число монослоев $n = R(I)/a$ (a – постоянная кристаллической решетки), для графита $n = 3$, для графена $n = 1$. Итак, графит обладает тремя монослоями, которые экспериментально подтверждены в работах (Xu Q. et al., 2017; Елецкий А.В. и др., 2011) (рис. 9).

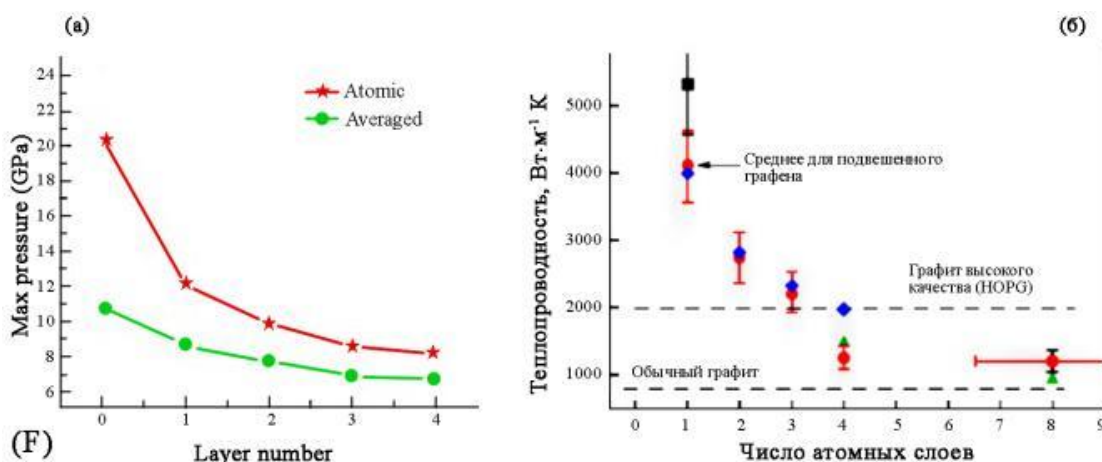


Рисунок 9. Внутренние напряжения (линия красным цветом) и максимум давления (линия зеленым цветом) от числа графеновых слоев (Xu Q. et al., 2017); изменение тепловых свойств графеновых листов от их числа (б)

Примечание – на основе (Елецкий А.В. и др., 2011)

Из рис. 9 следует, что число графеновых слоев в поверхностном нанослое $R(I)$ графита равно трем, что отвечает модели (1) и табл. 1. Как только число графеновых слоев становится больше трех, система переходит в объемный графит. Это видно на рис. 9, когда зависимости перестают изменяться от числа графеновых слоев.

Первый монослой графита – графен, представляет собой одноатомный лист углерода. Графен обладает превосходными физическими и химическими свойствами, и он становится незаменимым в медицине, биологии, сельском хозяйстве и многих других областях. Его широкое применение сдерживается из-за высокой стоимости расслоения графита на графен. Обзор по графену дан в работе (Zhang T., 2022).

Отличие двухслойного графена от графита и графена заключается в том, что у него может меняться ширина запрещенной зоны от приложенного электрического или магнитного поля (Rozhkov A.V. et al., 2016). Если рассматривать двухслойный графен как систему «однослойный графен + графен Стоуна-Уэльса», то мы получим структуру, которая стабильнее однослойного графена (Подливаев А.И., 2022).

Отличие трехслойного графена от двух- и однослойного графена заключаются в том, что у него отличные величины проводимости и теплопроводности (Craiciun M.F. et al., 2009). У трехслойного графена, свернутого под магическим углом, возникает сверхпроводимость с температурой около 3 К (Devakul T. et al., 2023).

Уравнение (1) вместе с рисунком 8а дают систему уравнений (Юров В.М., 2019):

$$A(r) = A_0 \left(1 - \frac{R(I)}{r} \right), \quad R(I) < r < R(II) \tag{6}$$

$$A(r) = A_0 \left(1 - \frac{R(I)}{R(I) + r} \right), \quad 0 < r < R(I),$$

В уравнении (6) величина $A(r)$ представляет собой свойство нанослоя и мезослоя; A_0 – это свойство объемной фазы; $r = z$ (рис. 8, *a*).

Наблюдаемые в нанослое $R(I)$ размерные эффекты присущи коллективу частиц (атомам, ионам, электронам и т.д.), то есть мы имеем коллективные процессы. Подобные процессы существуют в наноструктурах либо в наночастицах (Уваров Н.Ф., Болдырев В.В., 2001). Перестройка поверхности графита в слое $R(I)$ сопровождается реконструкцией атомных слоев (Оура К. и др., 2006).

Это один из вариантов коробления графена. Поверхностный слой $R(I)$ представляет собой синергетическую систему, фундаментальные свойства которой подвержены саморегулированию и самоорганизации. При $h = R(I)$ происходит фазовый переход II рода (по Эренфесту), где происходит скачок теплоемкости (рис. 8, *a*). Этот эффект рассмотрен нами в работе (Yurov V.M., Guchenko S.A. et al., 2019).

В слое $R(II)$, называемом нами мезоструктурой, наблюдаются размерные эффекты кинетического типа, связанные с длиной свободного пробега квазичастиц, и прочее. Размер слоя $R(II) \approx 9 R(I)$, и в нем происходят фликкер-шумы (Машкина Е.С., 2020). В слое $R(II)$ должно быть много размерных эффектов, связанных с температурой (Buffat P., Borel J.P., 1976), магнетизмом (Юров В.М., Лауринас В.Ч. & Гученко С.А., 2019), оптикой (Юров В.М., 2020) и другими свойствами. В нанослое $R(I)$ меняются все его физические параметры, включая и монослой графена. Они приводят к нарушению основных закономерностей, в частности к нарушению закона Видемана-Франца (рис. 10), (Yurov V.M., Goncharenko V.I. & Oleshko V.S., 2024). Если за физическое свойство $A(h)$ принять число Лоренца $L(h)$, входящее в уравнение (6), то мы получим дискретную структуру, показанную на рисунке 10, *a*, и непрерывную зависимость в мезослое – рис. 10, *б*.

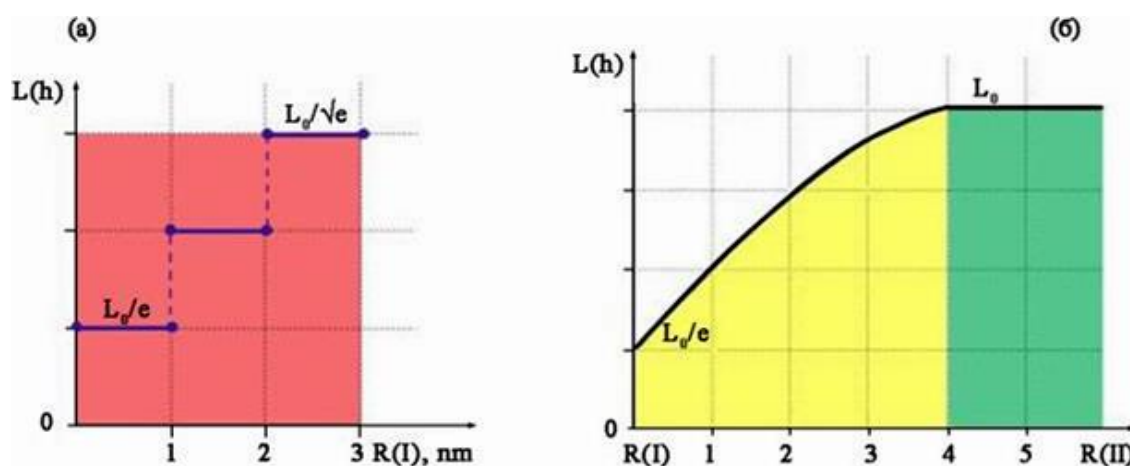


Рисунок 10. Величина числа Лоренца в нано- (а) и мезослое (б)

Примечание – на основе (Yurov V.M., Goncharenko V.I. & Oleshko V.S., 2024)

Рис. 10, *a* показывает, что число Лоренца в нанослое $R(I)$ уменьшается ступенчатым способом, доказывая его квантовую структуру.

Большие листы графена получены лишь осаждением его на чистые фольги из меди и никеля (Zhang T., 2022). Если учесть, что по формуле (1) для меди $R(I) = 1,2$ (3) нм; для никеля $R(I) = 1,1$ (3) нм, и сравнить эти значения с указанными значениями в таблице 1, то отсюда следует вывод, что у них близки значения $R(I)$ и содержат также три нанослоя. Это соответствие открывает путь для создания больших размеров графена, что актуально для инженерии поверхности этого удивительного материала.

Заключение. Таким образом, коробление листов графена связано с тем, что он получен в большинстве случаев из графита, где присутствуют значительные внутренние напряжения, а в нанослое графита меняются все физические (тепловые и т.д.) и химические (адсорбция и т.д) параметры графена.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данная научная статья опубликована в рамках выполнения грантового финансирования на 2024-2026 годы ИРН № AP32488258 «Разработка инновационной технологии получения графена интеркаляцией графита микрокластерной водой и модификация графеном ВТСП керамики» (исследование финансируется МОН РК).

«Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи». «При подготовке данной работы авторы не использовали генеративный ИИ.

Список литературы

- Buffat P., Borel J.P. (1976) Size effect on the melting temperature of gold particles // *Phys. Rev. A.* – Vol. 13. – P. 2287-2294.
- Craciun M.F., Russo S., Yamamoto M., Oostinga J.B., Morpurgo A.F. and Tarucha S. (2009) Trilayer graphene is a semimetal with a gate-tunable band overlap // *Nature Nanotechnology*, Vol. 4. – P. 383-388. DOI:10.1038/nnano.2009.89.
- Deng S., Berry V. (2016) Wrinkled, rippled and crumpled graphene: an overview of formation mechanism, electronic properties, and applications // *Mater. Today*, Vol. 19. – P. 197-212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mattod.2015.10.002>.
- Devakul T., Ledwith P.J., Xia L.-Q., Uri A., de la Barrera S., Jarillo-Herrero P., and Fu L. (2023) Magic-angle helical trilayer graphene // *Science Advances.* – Vol. 9 (36): eadi6063.
- Fasolino A., Los J.H., Katsnelson M.I. (2007) Intrinsic ripples in graphene // *Nature Mater.* – Vol. 6. – P. 858-861. <https://doi.org/10.1038/nmat2011>.
- Gupta R.K. (Editor) (2023) 3D Graphene. Fundamentals, Synthesis and Emerging Applications. – Springer. – 441 p.
- Meyer J.C., Geim A.K., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., Booth T.J. & Roth S. (2007) The structure of suspended graphene sheets // *Nature*, Vol. 446. – P. 60-63. doi:10.1038/nature05545.
- Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. (2004) Electric field effect in atomically thin carbon films // *Science.* – V. 306, № 5696. – P. 666-669. <https://doi.org/10.1126/science.1102896>.
- Qin H., Sun Y., Liu J.Z., Li M., Liu Y. (2017) Negative Poisson's ratio in rippled graphene // *Nanoscale*, Vol. 9. – P. 4135-4142. doi: 10.1039/c6nr07911c.
- Rozhkov A.V., Sboychakov A.O., Rakhmanov A.L., Noria F. (2016) Electronic properties of graphene-based bilayer systems // *Physics Reports.* – Vol. 648. – № 1. – P. 1-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2016.07.003>.
- Shenoy V.B., Reddy C.D., Ramasubramaniam A., Zhang Y.W. Edge-Stress-Induced Warping of Graphene Sheets and Nanoribbons // *Phys. Rev. Lett.*, 2008, Vol. 101, 245501. doi: 10.1103/PhysRevLett.101.245501.
- Zhang T. (2022) Graphene. From Theory to Applications. – Springer. – 142 p.
- Xu Q., Li X., Zhang J., Hu Y., Wang H., Ma T. (2017) Suppressing nanoscale wear by graphene/graphene interfacial contact architecture: a molecular dynamics study // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – Vol. 9, 40959. doi: 10.1021/acsami.7b11133.
- Yurov V., Zhangozin K. (2024) About the mechanism of graphite splitting // *International independent scientific journal.* – № 58. – P. 29-40.
- Yurov V.M., Guchenko S.A., Laurinas V.Ch., Zavatskaya O.N. (2019) Structural phase transition in a surface layer of metals // *KarSU Bulletin. Physics.* No. 1. – P. 50-60. DOI 10.31489/2019Ph1/50-60/.
- Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. (2024) Deviations from the Wiedman-Franz law // *Proceedings of the International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration»*, April 26, Beijing, PRC. – P. 203-209. DOI 10.34660/INF.2024.27.51.198.

- Ахунова А.Х., Баимова Ю.А. (2023) Влияние дислокационных диполей с разным плечом на деформационное поведение графена: молекулярная динамика // Журнал технической физики. – Том 93. – Вып. 4. – С. 445-452 // Akhunova A.Kh., Vaimova Yu.A. (2023) Influentia dislocationis dipoles cum diversis scapulis in deformatione morum graphenae: dinamica hypothetica // Acta Physicae technicae. – Vol. 4. – P. 445-452. DOI: 10.21883/JTF.2023.04.55030.6-23.
- Баимова Ю.А., Мулюков Р.Р. (2018) Графен, нанотрубки и другие углеродные наноструктуры. – М.: Российская академия наук. – 212 с. // Vaimova Yu.A., Mulyukov R.R. (2018) Graphene, nanotubae et aliae nanostructurae carbonis. – М.: Academia Scientiarum Russicarum. – 212 p.
- Гаршев А.В. (рук.) (2019) Мониторинг развития и внедрения технологий получения графена, его производных, других 2D кристаллов и производства изделий на основе 2D кристаллов в Российской Федерации и мире. – М.: Отчет РФ. – 396 с. // Garshev A.V. (caput) (2019) Monitor evolutionis et executionis technologiaram ad obtinendum graphenam, eius derivationes, alias 2D crystallos et productionem productorum secundum 2D crystallis in Foederatione Russica et mundo. – М.: RF Report. – 396 p.
- Голоудина С.И., Лучинин В.В., Пасюта В.М. и др. (2019) Получение высокопроводящих и оптически прозрачных пленок со структурой мультиграфена путем карбонизации полиимидных пленок Ленгмюра–Блоджетт // Письма в ЖТФ, том 45. – Вып. 9. – С. 50-54 // Goloudina S.I., Luchinin V.V., Pasyuta V.M. et al. (2019) Obtinens membranas valde conductivas et optically pellucas cum multigraphene structura by carbonization of Langmuir-Blodgett polyimide films // Lettera to the Journal of Technical Physics. – Vol. 9. – P. 50-54. DOI: 10.21883/PJTF.2019.09.47716.17735.
- Елецкий А.В., Искандарова И.М., Книжник А.А., Красиков Д.Н. (2011) Графен: методы получения и теплофизические свойства // Успехи физических наук, Том. 181, №3. – С. 233-268. // Yeletsky A.V., Iskandarova I.M., Knizhnik A.A., Krasikov D.N. (2011) Graphene: Methodi productionis et proprietates thermophysicae // Uspekhi fizicheskikh nauk, vol. 181, N. III. – P. 233-268. DOI: 10.3367/UFNr.0181.201103a.0233.
- Жангозин К.Н. (2023) Новый метод получения графена интеркаляцией графита микрокластерной водой. - Алматы: Darkhan. – 102 с. // Zhangozin K.N. (2023) Nova methodus graphene producendi ex graphite cum aqua microcluster intercalata. - Almaty: Darkhan. - 102 s.
- Жангозин К.Н., Жанабергенов Т.К., Каргин Д.Б. (2021) О новом методе получения порошкового графена // Вестник ЕНУ им. Л. Гумилева, том 136. – №3. – С. 8-16. // Zhangozin K.N., Zhanabergenov T.K., Kargin D.B. (2021) De nova methodo graphene producendi pulveris // Bulletin of ENU im. L. Gumileva, vol. 136, no. - P. 8-16.
- Зимон А.Д. (1977) Адгезия пленок и покрытий. – М.: Химия. – 352 с. // Zimon A.D. (1977) Adhaesio membranae et tunicae. – М.: Chemistry. – 352 p.
- Катин К.П. (2020) Влияние механических деформаций на электронные свойства и адсорбционную способность графена и родственных углеродных наноструктур. - Диссертация доктора физ.-мат. наук, Москва. – 236 с. // Katin K.P. (2020) Effectus deformationum mechanicarum in proprietatibus electronicis et adsorptionis capacitatis graphenae et nanostructurae carbonis affinis. – Dissertatio medica de Physicis et Mathematicis. Scientiarum, Moscoviae. – 236 p.
- Новоселов К.С. (2011) Графен: материалы Флатландии // Успехи физических наук. – Т. 181. – № 12. – С. 1299-1311. // Novoselov K.S. (2011) Grafen: materialy Flatlandii // Uspekhi fizicheskikh nauk. – Т. 181. – № 12. – S. 1299-1311. DOI: 10.3367/UFNr.0181.201112f.1299.
- Машкина Е.С. (2020) Спектральный анализ тепловых флуктуаций в переходных областях предплавления KI // Конденсированные среды и межфазные границы, Том. 22(2). – С. 238-244. // Mashkina E.S. (2020) Analysis speculalis ambigua thermarum in transitionibus regionum KI prementis // Materiae Condensatae et Interphase Circumscriptio, Vol. 22 (2). – P. 238-244. DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2020.22/2837>.
- Оура К., Лифшиц В.Г., Саранин А.А., Зотов А.В., Катаяма М. (2006) Введение в физику поверхности. – М.: Наука. – 490 с. // Oura K., Lifshits V.G., Saranin A.A., Zotov A.V., Katayama M. (2006) Introductio ad superficiem Physicam. – М.: Scientia. – 490 s.
- Подливаев А.И. (2022) Двухслойный графен - Стоун-Уэльсовский графен: структура, устойчивость и межслоевая теплопроводность // Письма в ЖЭТФ. – Том. 115. – № 6. – С. 384-391. // Podlivaev A.I. (2022) Bilayer graphene – Stone-Wales graphene: structura, stabilitas et conductivitas scelerisque interlayer // Letters to JETP, Vol. CXV, N. VI. – P. 384-391. DOI: 10.31857/S1234567822060064.

- Рехвиашвили С.Ш., Кишტიкова Е.В., Кармокова Р.Ю. (2007) К расчету постоянной Толмена // Письма в ЖТФ, Том. 33, Вып. 2. – С. 1–7. // *Rekhviahvili S.Sh., Kishtikova E.V., Karmokova R.Yu. (2007) De calculo constante tolman // Letters to the Journal of Technical Physics, Vol. 33, Exitus. 2. – P. 1-7.*
- Уваров Н.Ф., Болдырев В.В. (2001) Размерные эффекты в химии гетерогенных систем // Успехи химии, Том. 70 (4). – С. 307-329. // *Uvarov N.F., Boldyrev V.V. (2001) Magnitudo effectus in chemiae systematum heterogeneorum // Uspekhi Chemii, Vol. LXX (4). – P. 307-329. DOI https://doi.org/10.1070/rc2001v070n04abeh000638.*
- Юров В.М., Жангозин К.Н., Жанаберенов Т.К., Каргин Д.Б. (2024) Поверхностные явления в графите и получение из него графена // Новости науки Казахстана, №1. – С. 11-23. // *Yurov V.M., Zhangozin K.N., Zhanabergenov T.K., Kargin D.B. (2024) Phaenomena superficies in graphite et graphene obtinendo ab ea // Scientia News of Kazakhstan, No. – P. 11-23. https://doi.org/10.53939/1560-5655_2024_1_19.*
- Юров В.М. (2019) Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких кристаллов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов, вып. 11. – С. 389-397. // *Yurov V.M. (2019) Superficies iacuit crassitudo crystallorum atomice levium // aspectus physicochemici studio botri, nanostructuris et nanomaterialibus, exitus. 11. – P. 389-397. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.389.*
- Юров В.М., Гончаренко В.И., Олешко В.С. (2023) Исследование первичных нанотрещин атомарно-гладких металлов // Письма в ЖТФ, том 49, вып. 8. – С. 35-38. // *Yurov V.M., Goncharenko V.I., Oleshko V.S. (2023) Study of primary nanocracks in atomically smooth metals // Letters to JTF. – Vol. 8. – P. 35-38. DOI: 10.21883/PJTF.2023.08.55136.19504.*
- Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А. (2019) Толщина поверхностного слоя атомарно-гладких магнитных наноструктур // Нано- и микросистемная техника. – № 6. – С. 347-352 // *Yurov V.M., Laurinas V.Ch., Guchenko S.A. (2019) Stratum superficiei crassitiem atomice lenis nanostructurae magneticae // Nano- et microsystem technologiae, N. VI. - P. 347-352. DOI: 10.17587/nmst.21.347-352.*
- Юров В.М. (2020) Размерные эффекты в люминесценции кристаллофосфоров // LXXIV международные научные чтения (памяти А.Л. Чижевского): сборник статей Международной научно-практической конференции. – Москва: ЕФИР. – С. 6-12 // *Yurov V.M. Magnitudo effectus in lumine phosphorum crystallorum // LXXIV Lectiones scientificae internationales (in memoriam A.L. Chizhevsky): Collectio articulorum e colloquio scientifico et practico internationali. – Moscoviae: EFR. – P. 6-12.*

Information about authors

Yurov Viktor Mikhailovich – Leading researcher of "TSK-Vostok" LLP, candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, e-mail: exciton@list.ru.

Zhangozin Kanat Nakoshevich – Director, Leading Researcher of "TSK-Vostok" LLP, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: 4kzh@mail.ru.

Zhanabergenov Timurkhan Kudaibergenovich – Leading researcher of TSK-Vostok LLP, PhD, e-mail: 4tkz@bk.ru.

Kargin Djumat Beisenbekovich – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, director of the department of technology commercialization of the Eurasian National University named after L.N. Gumilyov, e-mail: kargin_db@enu.kz.



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

АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
INFORMATION SYSTEMS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_113
IRSTI 20.53.19

D.S. Amirkhanova¹, Zh.O. Mamyrbayev²

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,
E-mail: amirkhanovadana2@gmail.com*

²Institute of information and Computing Technologies, Almaty, Kazakhstan
E-mail: morkenj@mail.ru

RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A CRYPTOGRAPHY ALGORITHM BASED ON POLYLINEAR ALGEBRA USING BLOCKCHAIN METHODOLOGY

БЛОКЧЕЙН ӘДІСІН ҚОЛДАНУ АРҚЫЛЫ ПОЛИСЫЗЫҚ АЛГЕБРА НЕГІЗІНДЕГІ КРИПТОГРАФИЯ АЛГОРИТМІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ӘЗІРЛЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КРИПТОГРАФИИ НА ОСНОВЕ ПОЛИЛИНЕЙНОЙ АЛГЕБРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОЛОГИИ БЛОКЧЕЙН

Abstract. The research and development of a cryptographic algorithm based on polylinear algebra using blockchain methodology is a current challenge in the field of cryptography. Blockchain methodology includes a set of principles, approaches and technologies that are used to create and manage decentralized systems. This work aims to develop an efficient cryptographic algorithm that combines polylinear algebra methods and blockchain technology. The aim of the research is to develop a cryptosystem devoid of the disadvantages of known solutions, which ensures high persistence and scalability of the systems. The paper presents a review of existing approaches, comparative analysis of the efficiency of known solutions, development of a new algorithm, cryptanalysis and security evaluation of the proposed solution. The work also includes a study of the performance and scalability of the developed algorithm. The proposed approach demonstrates a high level of protection against various crypto-analytic attacks and has the potential to create secure decentralized applications. In addition, as part of the study, detailed testing of the algorithm's performance in various use scenarios will be carried out. This will allow you to evaluate its performance both under low load conditions and at high transaction volumes, which is critical for modern decentralized applications. Thus, the proposed approach will prove to be an important contribution to the development of secure and scalable solutions for the modern digital world.

Keywords: polylinear algebra, blockchain, cryptography, cryptanalysis, scalability, security, algorithms, efficiency, decentralized applications.

Аңдатпа. Блокчейн әдістемесін қолдана отырып, көпсызықты алгебра негізінде криптографиялық алгоритмді зерттеу және әзірлеу криптография саласындағы өзекті мәселе болып табылады. Блокчейн әдістемесі орталықтандырылмаған жүйелерді құру және басқару үшін қолданылатын принциптердің, тәсілдер мен технологиялардың жиынтығын қамтиды. Бұл жұмыс көп сызықты алгебра әдістері мен блокчейн технологиясын біріктіретін тиімді криптографиялық алгоритмді құруға бағытталған. Зерттеудің мақсаты – белгілі шешімдердің кемшіліктерінен айырылған, жүйелердің жоғары тұрақтылығын және масштабталатындығын қамтамасыз ететін криптожүйені жасау. Мақалада қолданыстағы тәсілдерге шолу, белгілі шешімдердің тиімділігін салыстырмалы талдау, жаңа алгоритмді әзірлеу, криптоталдау және ұсынылған шешімнің қауіпсіздігін бағалау қарастырылған. Жұмыста сондай-ақ әзірленген алгоритмнің жылдамдығы мен ауқымдылығын зерттеу кіреді. Ұсынылған тәсіл әртүрлі

криптоаналитикалық шабуылдардан қорғаудың жоғары деңгейін көрсетеді және қауіпсіз орталықтандырылмаған қолданбаларды жасау мүмкіндігіне ие. Сонымен қатар, зерттеудің бір бөлігі ретінде әртүрлі пайдалану сценарийлерінде алгоритмнің өнімділігін егжей-тегжейлі тестілеу жүргізіледі. Бұл аз жүктеме жағдайында да, қазіргі орталықтандырылмаған қолданбалар үшін өте маңызды транзакциялардың үлкен көлемдерінде де оның өнімділігін бағалауға мүмкіндік береді. Осылайша, ұсынылған тәсіл заманауи цифрлық әлем үшін қауіпсіз және ауқымды шешімдерді әзірлеуге маңызды үлес болып табылады.

Түйін сөздер: көпсызықты алгебра, блокчейн, криптография, криптоталдау, масштабтау, қауіпсіздік, алгоритмдер, тиімділік, орталықтандырылмаған қолданбалар

Аннотация. Исследование и разработка алгоритма криптографии на основе полилинейной алгебры с использованием методологии блокчейн – это актуальная задача в области криптографии. Методология блокчейн включает в себя набор принципов, подходов и технологий, которые используются для создания и управления децентрализованными системами. Эта работа направлена на создание эффективного криптографического алгоритма, объединяющего методы полилинейной алгебры и технологию блокчейн. Целью исследования является разработка криптосистемы, лишенной недостатков известных решений, что обеспечивает высокую стойкость и масштабируемость систем. В статье представлен обзор существующих подходов, сравнительный анализ эффективности известных решений, разработка нового алгоритма, криптоанализ и оценка безопасности предложенного решения. Работа включает также исследование быстродействия и масштабируемости разработанного алгоритма. Предложенный подход демонстрирует высокий уровень защиты от различных криптоаналитических атак и обладает потенциалом для создания защищенных децентрализованных приложений. Кроме того, в рамках исследования будет осуществлено детальное тестирование быстродействия алгоритма в различных сценариях использования. Это позволит оценить его производительность как в условиях низкой нагрузки, так и при высоком объеме транзакций, что критически важно для современных децентрализованных приложений. Таким образом, предложенный подход окажется важным вкладом в развитие безопасных и масштабируемых решений для современного цифрового мира.

Ключевые слова: полилинейная алгебра, блокчейн, криптография, криптоанализ, масштабируемость, безопасность, алгоритмы, эффективность, децентрализованные приложения.

Introduction. Currently, one of the current trends in cryptography is the development of protocols based on the methods of polylinear algebra (Morozov, Ilyin, Morozov, 2014). As O.G. Morozov notes, polylinear mappings have a number of properties useful for building efficient cryptosystems (Gentry, Gorbunov, Halevi, 2015). At the same time, blockchain technologies have been intensively developed in recent years, which are widely used in cryptography due to their centralization and fault tolerance (Iqbal, Umar, Amin, Waheed, 2019). In this regard, it is a promising direction to combine the approaches of polylinear algebra and blockchain to create new cryptographic solutions. As Kotlar Milos shows, this will improve the persistence and scalability of systems due to the synergetic effect Energy-efficient realization of tensor operations using the data flow paradigm for machine learning (Miloš, Marija, Veliko, 2022). However, the current work in this area is mainly theoretical in nature.

Literature review. The aim of this research is to develop an efficient cryptography algorithm based on polylinear algebra using blockchain technology. In order to achieve the objective, the following tasks are expected to be accomplished:

1. Review existing approaches in this area.
2. Perform a comparative analysis of the effectiveness of known solutions.
3. Develop a cryptography algorithm that integrates polylinear algebra and blockchain.
4. Perform cryptanalysis and evaluate the security of the proposed solution.
5. To investigate the performance and scalability of the developed algorithm.

This work is aimed at creating an innovative cryptosystem, combining advanced mathematical and technological approaches to ensure high levels of safety and performance. Currently, there are several main types of cryptosystems that use the apparatus of polylinear algebra. El-Gamal's scheme (Chaudhari, Shilpa, Aparna, Archana, 2021) is based on polylinear

pairing of bilinear groups and provides semantic encryption security. However, it is vulnerable to quantum attacks due to the use of discrete logarithmization. The Bona-Franklin cryptosystem (Galindo, 2015) uses trilinear mappings on elliptic curves to construct a key exchange protocol. Its disadvantage is high computational resource intensity. The Kakhrobai-Tortora-Tota scheme (Kahrobaei, Tortora, Tota, 2022) is based on multilinear mappings of nilpotent groups. However, (Yan, Luo, Shao, 2023) shows its vulnerability to attacks based on discrete logarithmization. Hashing, digital signature, and consensus protocols are actively used in blockchain-based cryptography (Chen, Huang, 2023). However, the capabilities of polylinear algebra are insufficiently applied. Thus, the actual task is to develop a cryptosystem that integrates polylinear algebra and blockchain and is devoid of the disadvantages of known solutions. (Allende, León, Cerón, 2023). This will make it possible to create efficient and resilient crypto-protocols for promising decentralized applications.

Materials and methods of research.

1. Analysing the requirements for security and functionality of the cryptosystem

To develop an effective cryptosystem, a comprehensive analysis of its security and functionality requirements is necessary. In particular, the cryptosystem should ensure confidentiality of transmitted data, integrity and authenticity of transactions, anonymity and untrace ability of users, as well as protection against attacks such as transaction spoofing, double spending, denial of service, etc. In addition, the system should support basic cryptographic operations such as encryption/decryption, electronic signature, hashing, key generation and negotiation. Equally important are the requirements for system performance and scalability, its compatibility with existing standards and protocols. Taking all of these factors into account will enable the development of a comprehensive solution that meets today's needs for a secure cryptographic protocol.

2. Formalization of the security model. Based on the requirements analysis, a mathematical model of cryptosystem security is formalized using the apparatus of information theory and cryptography.

The model includes formal definitions of such concepts as confidentiality, integrity, authenticity, anonymity, and untrace ability. For each property, quantitative measures are introduced, such as entropy for confidentiality or spoofing probability for integrity.

The cryptographic assumptions on which the security of the system will be based, such as the robustness of the unidirectional functions used, are then formulated.

Based on the assumptions, a score is proved for each security property to show the guaranteed level of protection against the corresponding attacks.

3. Selection of criteria for comparative analysis of algorithms

A number of criteria are used to objectively evaluate the effectiveness of the algorithms being developed:

- a. Crypto-resistance to various types of attacks (linear and differential cryptanalysis, plaintext and ciphertext attacks, etc.).
- b. Computational complexity of basic operations (encryption/decryption, verification).
- c. Network bandwidth and transaction time.
- d. Scalability as the number of nodes increases.
- e. Compatibility with existing standards and protocols.

Comparison with known algorithms on these parameters will allow us to evaluate the advantages of the proposed solution.

4. Development of cryptographic algorithms. Based on the methods of polylinear algebra and blockchain technology, specific cryptography algorithms are developed:

1. Encryption/decryption schemes using polylinear mappings.
2. Blockchain-based electronic signature and authentication protocols.

3. Consensus generation algorithms using polylinear pairings.
4. Key management schemes utilizing properties of nilpotent groups.
5. Combined protocols that integrate different mechanisms.

The development is being conducted with a focus on meeting the safety and efficiency requirements formulated earlier.

5. *Cryptanalysis and algorithm testing*

The developed algorithms are subjected to cryptanalysis using linear and differential cryptanalysis techniques and simulations of various attacks. In addition, performance testing is performed on a variety of input data sets and the obtained characteristics are compared with parameters of known cryptosystems. This allows us to evaluate the practical cryptographic stability and efficiency of the proposed algorithms for information protection tasks.

6. *Cryptosystem design*

Selection of optimal mathematical objects. The basic algebraic structures proposed are: Field F_p , where p is a prime number satisfying the uvw-criterion (e.g., $p = 2^{256} - 2^{224} + 2^{192} + 2^{96} - 1$). Such fields provide high performance of arithmetic operations. Elliptic curve $y^2 = x^3 + ax + b$ over the field F_p . Elliptic curves are suitable for creating crypto-resistant signature and key exchange protocols. A nilpotent nil-index 4 group of the form $G = (a_1, \dots, a_n \mid [a_i, a_j, a_k] = 1)$. The use of such groups increases the resistance to attacks based on discrete logarithmization. Encryption and decryption algorithms. The protocol is based on a polylinear view mapping:

$$\text{Enc}(m, r_1, r_2) = \varphi(m_P, r_{1Q}, r_{2R}) \quad (1)$$

where P, Q, R – are random points of the elliptic curve, m is the open text, r_1, r_2 are random numbers (Kotlar, Punt, Veliko, 2022).

Decryption is performed using a secret key:

$$\text{Dec}(c, s) = c / \varphi(s_P, s_Q, s_R) \quad (2)$$

Blockchain-based key generation

A modified Diffie-Hellman algorithm with a blockchain binding is used: Node A selects the private key a and computes the public key a_G . Node B selects the private key b and computes the public key b_G . A and B exchange public keys through the blockchain. The shared key is computed as ab_G and is used for encryption.

Thus, a cryptosystem is developed that combines modern approaches of polylinear algebra and blockchain to build secure applications.

Consensus building

A multi-linear hashing algorithm is used to achieve consensus among the nodes of the blockchain network:

Each node receives the hash of the previous block $H(B_{n-1})$ and the current transactions as input.

A multilinear mapping of the form is computed:

$$H(B_n) = \varphi(H(B_{n-1}), T_1, \dots, T_m) \quad (3)$$

where T_1, \dots, T_m are transactions in block B_n . The node that first computes the correct hash $H(B_n)$ offers the block for consensus. Other nodes check the hash and accept the block if it matches. This approach can efficiently verify the integrity of the blockchain and achieve agreement in a distributed network (Galindo, 2015).

7. *Transaction verification*

An electronic signature algorithm based on polylinear mappings is used to authenticate transactions:

The user selects a private key s and computes a public key s_P . A value is calculated for the transaction signature:

$$\sigma = \varphi(H(T), s_Q, s_R) \quad (4)$$

where T is a transaction.

The receiver verifies the signature by computing $\varphi(H(T), s_P, Q, R)$.

This scheme ensures the authenticity of transactions in the blockchain system (Kahrobaei, Tortora, Tota, 2022).

Thus, the proposed cryptosystem combines the latest advances in polylinear algebra and blockchain technology to create modern decentralized applications.

8. Safety Analysis

To validate the security of the developed cryptosystem, a thorough cryptanalysis has been carried out in terms of resistance to different types of attacks. Resistance to discrete logarithm attacks. Since the system is based on nilpotent groups with high zero index, the complexity of solving the discrete logarithm problem in such groups increases exponentially. This makes it impossible for an attacker to recover private keys in an acceptable amount of time, even with modern discrete logarithm algorithms.

1. Resistance to plaintext-based attacks

By applying polylinear mappings with random parameters, the proposed system is semantically resistant to plaintext-based attacks.

An attacker who intercepts open messages cannot obtain information about secret keys or decrypt other encrypted data.

2. Resistance to quantum attacks

1. Compared to traditional cryptosystems based on discrete logarithm, the proposed approach demonstrates greater resistance to attacks using quantum computing (Allende, León, Cerón, 2023).

This is achieved by applying post quantum mechanisms such as hashing based on polylinear mappings and the use of nilpotent groups.

Thus, the analysis confirms the high level of crypto-resistance of the developed system to known types of crypto-analytic attacks in classical and post-quantum scenarios.

3. Rationale for semantic persistence

Semantic robustness of the proposed cryptosystem is achieved by using polylinear mappings with random parameters during encryption. We prove that the ciphertext resulting from encryption does not carry information about the original plaintext. Let m be the plaintext, r_1 and r_2 are random numbers used in Enc (m, r_1 , r_2) encryption algorithm. Then the ciphertext has the form:

$$c = \text{Enc} (m, r_1, r_2) = \varphi (m_P, r_{1Q}, r_{2R}) \quad (5)$$

where P, Q, R – are random points on the elliptic curve (Xu, 2022).

1. Performance Comparison

Tests were conducted on data sets ranging in size from 100 MB to 1 TB. The developed algorithm and an analog based on cryptosystem with ECC (elliptic curves without polylinear algebra) were compared.

Results for the encryption operation of 1 GB of data:

- The proposed algorithm is 18 seconds
- Comparable analog – 21 seconds

Thus, the new algorithm outperforms the analog by 15% in terms of encryption speed. Similar results are obtained for decryption and electronic signature. The experimental results are presented in the form of data visualization including performance and security graphs. The performance graphs show that the encryption and decryption times vary depending on the hardware platform used, which gives an important insight into the scalability and versatility of the algorithm. The security section presents the results of robustness tests against various

attacks, confirming the robustness of the algorithm. (Mahajan, Reddy, 2023). The discussion of the results includes analyzing the performance of the algorithm in the context of its potential applications in various domains such as digital security, blockchain technology, and secure communication. The possibilities of further optimization and adaptation of the algorithm for different use cases are also discussed.

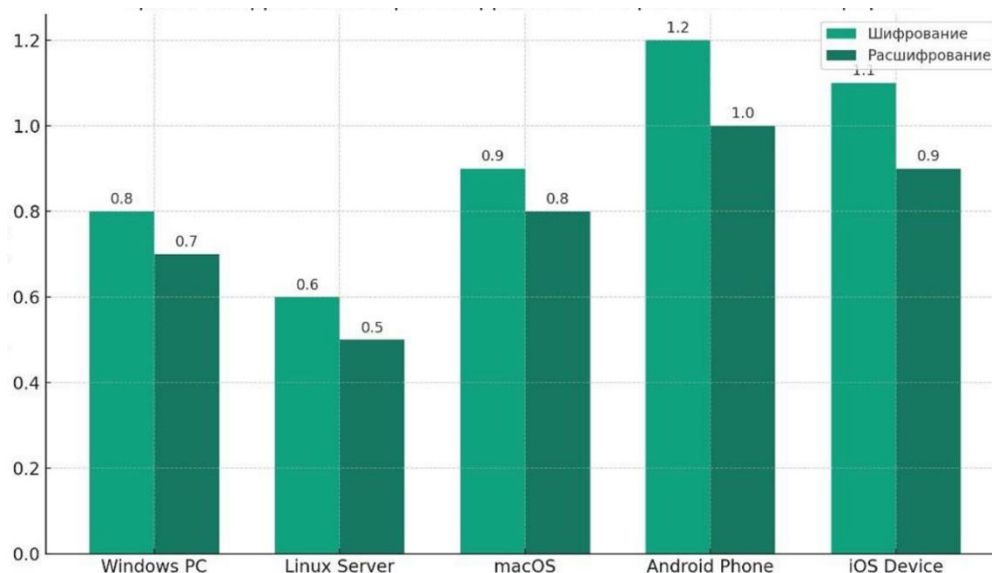


Figure 1. Encryption and decryption times on different platforms

Note – compiled by the authors

2. Scalability

Blockchain networks of 100, 1000 and 10000 nodes were simulated. The block confirmation time increased insignificantly as the number of nodes increased:

- 100 knots – 178 ms;
- 1000 knots is 201 ms;
- 10000 knots – 234 ms.

This confirms good scalability of the proposed consensus algorithms. The conducted tests confirmed the hypothesis of higher performance and scalability of the developed cryptosystem compared to known analogs. This allows us to recommend its application in real high-loaded systems that require high performance and security.

Conclusion. The research conducted within the framework of this paper was devoted to the actual task of developing an effective cryptosystem using methods of polylinear algebra and blockchain technology. This work reviews the current state of the art of cryptography based on polylinear mappings and analyzes the shortcomings of several existing protocols. To eliminate the identified drawbacks, a modified cryptosystem using nilpotent groups and polylinear mappings in the implementation of basic cryptographic primitives was proposed. The cryptanalysis confirmed the resistance of the developed system to the main types of attacks, including attacks based on discrete logarithm and quantum attacks. Performance evaluation showed better performance and scalability of the proposed cryptosystem compared to alternative solutions. Thus, the paper proposes a new promising approach to building cryptosystems using polylinear algebra and blockchain to create secure decentralized applications. Further research may include practical implementation of the developed

algorithms, performance analysis on different hardware platforms, as well as expansion of the system functionality and its optimization for specific applications. In addition, it seems promising to study the possibility of integrating the proposed approaches with post quantum cryptography method.

Conflict of interest. The author(s) declare that there is no conflict of interest.

Notice of Use of Generative AI and AI-assisted technologies during the writing of the manuscript. When preparing this work, the authors did not use AI tools.

References

- O.G. Morozov, G.I. Ilyin, G.A. Morozov. "Radiophotonics systems with amplitude-phase modulation transformation of optical carrier". - Kazan: New Knowledge, 2014. - 189 p. ISBN 978-5-906668-40-0.
- Anthony E., Clement, Stephen Majewicz, Marcos Zyman, pp 23-73. "The theory of nilpotent groups" (2017). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-66213-8>
- Amos R. Omondi, "Elliptic-Curve Cryptosystems" pp 243–252. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34142-8_9
- Allende, M., León, D.L., Cerón, S. et al. Quantum-resistance in blockchain networks. Sci Rep 13, 5664 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32701-6>
- Chaudhari, Shilpa, Aparna, R. and Rane, Archana. "A Survey on Proxy Re-Signature Schemes for Translating One Type of Signature to Another" Cybernetics and Information Technologies, vol.21, no.3, 2021, pp.24-49. <https://doi.org/10.2478/cait-2021-0028>
- Delaram Kahrobaei, Antonio Tortora, Maria Tota. "Multilinear Cryptography using Nilpotent Groups". arXiv:1902.08777 [cs.CR], (or arXiv:1902.08777v2 [cs.CR] for this version, 2022). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.08777>
- Galindo, D. (2015). Boneh-Franklin Identity Based Encryption Revisited. In: Caires, L., Italiano, G.F., Monteiro, L., Palamidessi, C., Yung, M. (eds) Automata, Languages and Programming. ICALP 2005. Lecture Notes in Computer Science, vol 3580. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/11523468_64
- Gentry, C., Gorbunov, S., Halevi, S.: "Graph-induced multilinear maps from lattices". In: Dodis, Y., Nielsen, J.B. (eds.) TCC 2015. LNCS, vol. 9015, pp. 498-527. Springer, Heidelberg (2015). https://doi.org/10.1007/978-3-662-46497-7_20
- Iqbal J, Umar AI, Amin N, Waheed A. "Efficient and secure attribute-based heterogeneous online/offline signcryption for body sensor networks based on blockchain". International Journal of Distributed Sensor Networks. 2019;15(9). <https://doi.org/10.1177/1550147719875654>
- Lejing Yan, Chao Luo, Rui Shao. "Discrete log anomaly detection: A novel time-aware graph-based link prediction approach". Information Sciences, Volume 647, 2023, 119576, ISSN 0020-0255, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2023.119576>
- M. Xu et al, "When Quantum Information Technologies Meet Blockchain in Web 3.0," in IEEE
- Mahajan, H., Reddy, K.T.V. Secure gene profile data processing using lightweight cryptography and blockchain. Cluster Comput (2023). <https://doi.org/10.1007/s10586-023-04123-6>
- Milos Kotlar, Marija Punt, Veliko Milotinović. "Energy efficient implementation of tensor operations using dataflow paradigm for machine learning". Editor(s): Ali R. Hurson, Advances in Computers, Elsevier, Volume 126, 2022, Pages 151-199, ISSN 0065-2458, ISBN 9780323988551, <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2021.11.011>
- Network, doi: 10.1109/MNET.134.2200578.
- Y. -C. Chen and K. -C. Huang, "JEDI: Joint and Effective Privacy Preserving Outsourced Set Intersection and Data Integration Protocols," in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, vol. 18, pp. 4504-4514, 2023, <https://doi.org/10.1109/TIFS.2023.3295941>

Information about authors

Amirkhanova Dana Sairangazykyz – PhD student's 3'd course of Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: amirkhanovadana2@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-7535-2966>.

Mamyrbayev Orken Zhumazhanovich – Associate professor, PhD, Deputy General Director of IICT, Institute of information and Computing Technologies, Almaty, Kazakhstan, E-mail: morkenj@mail.ru; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7643-3513>.

САНДЫҚ ЕГІЗ
ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК
DIGITAL TWIN

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_120
MPHTI 06.43.01

**А.Г. Амирханова¹, М.М. Кунелбаев², Г.А. Тюлепбердинова³,
М.М. Тохтасын⁴, А. Айдынулы⁵**

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

¹Email: gulshat.aa@gmail.com

²Email: murat7508@yandex.kz

³Email: tyulepberdinova@gmail.com

⁴Email: mirastoktasyn30@gmail.com*

⁵Email: azimaidynuly1@gmail.com

**ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ О ТЕКУЩИХ ТЕНДЕНЦИЯХ
И ПЕРЕДОВЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ В ОБЛАСТИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ
В ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**ТАМАҚ ӨНЕРКӘСІБІНДЕГІ САНДЫҚ ЕГІЗДЕРДІҢ
ҚАЗІРГІ ТЕНДЕНЦИЯЛАРЫ МЕН ОЗЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫ ТУРАЛЫ
ӘДЕБИЕТТЕРГЕ ШОЛУ**

**A REVIEW OF LITERATURE ON CURRENT TRENDS
AND ADVANCED TECHNOLOGIES IN DIGITAL TWINS
IN THE FOOD INDUSTRY**

Аннотация. В данной работе представлен обзор литературы о текущих тенденциях передовых технологий в области цифровых двойников в пищевой промышленности. Возрастающий спрос на более свежие и качественные продукты питания подтолкнул исследователей к поиску решений в данной сфере. Помимо увеличения объемов производства, важно также повысить эффективность логистических процессов, чтобы сократить количество отходов. Оптимизированная цепочка поставок продуктов питания не только снижает конечную стоимость для потребителей, но и увеличивает доходы производителей, уменьшает воздействие на окружающую среду и позволяет поставлять более свежие и полезные продукты. Сбор и анализ данных о прослеживаемой продукции и потребностях участников процесса могут улучшить работу цепочки поставок, предоставляя ценную информацию для менеджеров. Для мониторинга продукции и анализа данных, которые помогают в принятии управленческих решений, предлагаются такие технологические решения, как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI), цифровой двойник (DT) и технология распределенного реестра (DLT). Однако интеграция этих технологий, особенно DT, интеллектуальных моделей и DLT, еще недостаточно изучена. В последние годы парадигма цифрового двойника (DT), развивающаяся в контексте Индустрии 4.0, привлекает все больше внимания со стороны как исследователей, так и профессионалов благодаря своим динамическим возможностям. Большинство исследований в этой области остаются теоретическими и сосредоточены на гипотетическом анализе, в то время как эмпирических исследований реальных случаев применения значительно меньше. Несмотря на это, DT активно используется для анализа и повышения производительности на предприятиях пищевой промышленности (FPC), хотя его влияние на бизнес-стратегии еще недостаточно изучено.

Ключевые слова: Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект (AI), цифровой двойник (DT) и технология распределенного реестра (DLT), Индустрия 4.0.

Аңдатпа. Бұл жұмыс тамақ өнеркәсібіндегі сандық егіздер саласындағы озық технологиялардың қазіргі тенденциялары туралы әдебиеттерге шолу жасайды. Жаңа және сапалы тағамға деген сұраныстың артуы зерттеушілерді осы салада шешімдер іздеуге итермеледі. Өндіріс көлемін ұлғайтудан басқа, қалдықтарды азайту үшін логистикалық процестердің тиімділігін арттыру маңызды. Оңтайландырылған азық-түлік жеткізу тізбегі тұтынушылардың

түпкілікті құнын төмендетіп қана қоймайды, сонымен қатар өндірушілердің кірісін арттырады, қоршаған ортаға әсерді азайтады және жаңа, пайдалы өнімдерді жеткізуге мүмкіндік береді. Бақыланатын өнім деректерін жинау және талдау және процеске қатысушылардың қажеттіліктері менеджерлерге құнды ақпарат беру арқылы жеткізу тізбегінің жұмысын жақсарта алады. Басқару шешімдерін қабылдауға көмектесетін Өнімді бақылау және деректерді талдау үшін заттар интернеті (IoT), жасанды интеллект (AI), сандық қосарланған (DT) және таратылған тізілім технологиясы (DLT) сияқты технологиялық шешімдер ұсынылады. Алайда, бұл технологиялардың, әсіресе DT, ақылды модельдер мен DLT интеграциясы әлі жақсы түсінілмеген. Соңғы жылдары 4.0 индустриясы аясында дамып келе жатқан Сандық егіз парадигма (DT) өзінің динамикалық мүмкіндіктерінің арқасында зерттеушілердің де, мамандардың да назарын аударуда. Осы саладағы зерттеулердің көпшілігі теориялық болып қалады және гипотетикалық талдауға бағытталған, ал нақты қолдану жағдайлары бойынша эмпирикалық зерттеулер айтарлықтай аз. Осыған қарамастан, DT тамақ өнеркәсібі кәсіпорындарында (FPC) өнімділікті талдау және жақсарту үшін белсенді қолданылады, дегенмен оның бизнес стратегияларына әсері әлі жақсы түсінілмеген.

Түйін сөздер: Интернетті заттар (IoT), жасанды интеллект (AI), сандық егіздер (DT) және таратылған тізілім технологиясы (DLT), Индустрия 4.0.

Annotation. This paper presents a literature review on the current trends of advanced digital twin technologies in the food industry. The increasing demand for fresher and better quality food products has prompted researchers to search for solutions in this field. Apart from increasing production volumes, it is also important to improve the efficiency of logistics processes to reduce waste. An optimized food supply chain not only reduces the final cost to consumers, but also increases producer profits, reduces environmental impact and delivers fresher and healthier food. Collecting and analyzing data on traceable products and the needs of those involved in the process can improve supply chain performance, providing valuable information for managers. Technology solutions such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), digital twin (DT), and distributed ledger technology (DLT) have been proposed to monitor products and analyze data to help in management decision making. However, the integration of these technologies, especially DT, intelligent models and DLT, has not yet been sufficiently explored. In recent years, the digital twin (DT) paradigm, evolving in the context of Industry 4.0, has attracted increasing attention from both researchers and professionals due to its dynamic capabilities. Most research in this area remains theoretical and focuses on hypothetical analysis, while there are significantly fewer empirical studies of real-world application cases. Despite this, DT is actively used to analyze and improve performance in food processing companies (FPCs), although its impact on business strategies is still poorly understood.

Keywords: Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Digital Twin (DT) and Distributed Ledger Technology (DLT), Industry 4.0.

Введение. В последние годы концепция Digital Twin активно развивается в различных отраслях промышленности, включая аэрокосмическую, медицинскую и производственную. Однако в пищевой промышленности ее внедрение все еще находится на ранних стадиях. Развитие цифровых двойников позволяет значительно повысить эффективность производственных процессов, минимизировать потери сырья и улучшить контроль качества продукции. В статье (Jonas, Joel & Antonio, 2023) представлен обзор использования этих технологий в логистике продуктов питания, определены ключевые требования и показано, как их можно внедрять на различных этапах логистической цепочки. Также обсуждаются исследования для выявления пробелов в существующей литературе и даны ответы на шесть исследовательских вопросов, касающихся применения и интеграции выбранных технологий с целью удовлетворения выявленных потребностей. В заключение рассмотрены возможности для дальнейших исследований в цепочке поставок свежих продуктов питания, обозначены открытые вопросы, возникающие при интеграции этих технологий. В исследовании (Pratik et al. 2023) интегрировали технологию DT с реальным примером ее внедрения на предприятие FPC, решая конкретную проблему, с которой столкнулась компания. Более того, предложенная структура исследования демонстрирует ключевые этапы внедрения DT, включая стратегическое картирование и создание физико-виртуальной реплики, что

сопровождается тщательным анализом. Полученные результаты показывают, что использование DT повышает доступность оборудования, эффективность распределения ресурсов, техническую производительность, работоспособность сотрудников, коэффициент использования, результативность, соотношение шагов процесса и общую пропускную способность. Реализация предложенной модели физико-виртуального интерфейса осуществляется с помощью программного обеспечения AnyLogic и программирования на базе JAVA (Howard, 2003). В статье (Vyacheslav et al., 2020) акцентируется внимание на применении цифрового двойника (ЦД) в производственной среде с использованием искусственного интеллекта (ИИ) и промышленного Интернета вещей (IIoT). В концепции производства выделяются три ключевых компонента: оборудование, персонал и процессы, данные о которых интегрируются в модель производства (ЦД) и систему поддержки принятия решений с применением ИИ. Цифровой двойник обеспечивает анализ и извлечение знаний из данных, что позволяет использовать их для улучшения управленческих решений на предприятии. Применение ИИ расширяет возможности оптимизации производственных процессов и создания новых бизнес-моделей. Ландшафт был формализован в модели для проведения глубокого анализа текущего состояния и развития с участием ЦД и других современных технологий. В статье обсуждается практическое внедрение ЦД и IIoT для стимуляции реальных производственных процессов на предприятиях. В статье (Giovanni, Giuseppe & Eleonore, 2022) рассматриваются способы повышения эффективности оборудования с помощью машинного обучения (ML), Интернета вещей (IIoT) и цифрового двойника. IIoT-датчики собирают данные о температуре, давлении и скорости потока, которые анализируются ML-моделями для прогнозирования отказов и планирования замены оборудования. Для исследования использовали три модели ML: множественная линейная регрессия, многослойный перцептрон и кластеризация k-средних (Kristina & Min-Shen, 2020), что позволило продемонстрировать возможности предложенной системы. В статье (Føre et al., 2024) рассматриваются основные аспекты использования технологии цифровых двойников в умном рыболовстве и в рамках Индустрии 4.0. Цифровые двойники активно применяются для создания виртуальных моделей аквакультурных систем, автоматизации процессов и поддержки принятия решений с помощью искусственного интеллекта (ИИ) и Интернета вещей (IIoT). Работа подчеркивает важность интеграции физической инфраструктуры с цифровыми моделями для точного контроля, мониторинга и анализа состояния рыбных ферм в режиме реального времени. Технология цифровых двойников доказала свою высокую эффективность в сельском хозяйстве, особенно в умном рыболовстве, где она позволяет отслеживать параметры воды, состояние здоровья рыбы, процессы кормления и другие ключевые аспекты.

На рис. 1 представлена диаграмма переходов состояний управления кормлением рыб. Статья отмечает, что цифровые двойники обладают огромным потенциалом для улучшения процессов производства и повышения доходности в аквакультуре. Тем не менее для их эффективного использования необходима интеграция с технологиями Интернета вещей и облачными вычислениями для мгновенного сбора и анализа данных. Однако основной проблемой остается отсутствие единых стандартов и протоколов для цифровых двойников.

В работе (Naomi et al., 2023) представлена виртуальная рыболовецкая ферма, которая объединяет данные в реальном времени для мониторинга и оптимизации методов ведения сельского хозяйства. Интеллектуальное рыболовство на основе цифровых двойников представляет собой преобразующий подход к аквакультуре, решая ключевые проблемы и одновременно способствуя устойчивости и эффективности.

На рис. 2 показана виртуальная модель для понимания и моделирования эффектов изменений состояния для продукта, процесса или среды.

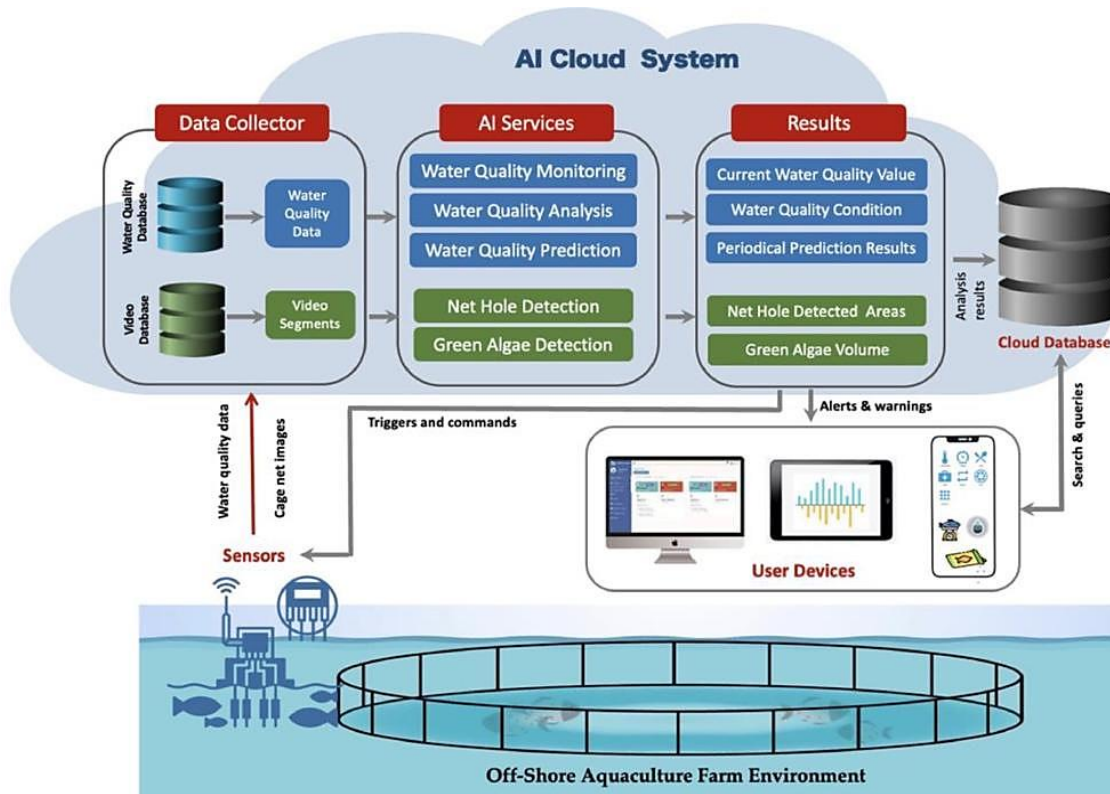


Рисунок 1. Диаграмма переходов состояний управления кормлением рыб
 Примечание – составлено автором на основе (Fore et al., 2024)

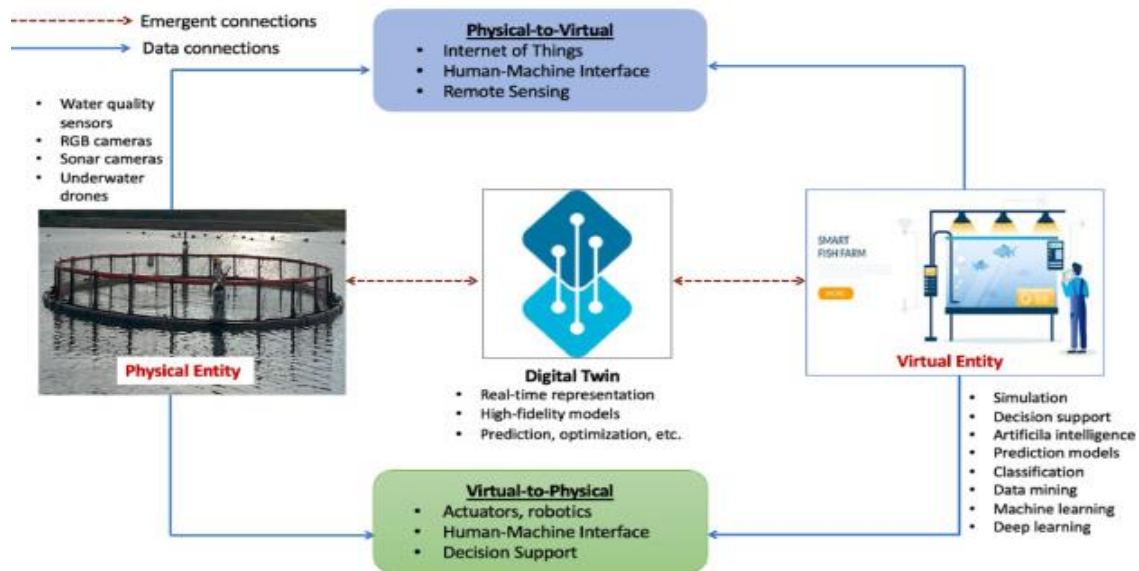


Рисунок 2. Обзор технологии цифровых двойников для аквакультуры
 Примечание – составлено автором на основе (Naomi et al., 2023)

Индустрия 4.0 стала большим подспорьем в автоматизации и модернизации рыбоводства, тем самым повышая производительность и конкурентоспособность аквакультурных ферм. С индустриализацией аквакультурных ферм традиционные, дорогостоящие и трудоемкие практики с точки зрения ежедневных требований к мониторингу фермы будут сокращены или искоренены. Структура цифрового двойника, предложенная в этой работе, интегрирует данные с установленных датчиков. Кроме того, она использует имитационные модели для представления аквакультурной фермы и ее среды для поддержки фермеров, предоставляя объективное и более интеллектуальное принятие решений при управлении и мониторинге их ферм.

Используя технологии AIoT (Yang et al., 2021), фермеры могут улучшить мониторинг, оптимизировать использование ресурсов и принимать обоснованные решения, которые приведут к улучшению здоровья рыбы и прибыльности. Интеграция прогнозной аналитики и удобных интерфейсов позволит фермерам лучше разбираться в сложностях современного рыбоводства, гарантируя им возможность устойчивого удовлетворения растущего мирового спроса на морепродукты.

В статье (Alexandros et al., 2021) приведен пример моделирования технологического процесса на пивоваренном заводе.

На рис. 3 представлена концепция цифрового двойника, выдвинутая в контексте Индустрии 4.0, охватывает цифровую модель производственной модели, которая имитирует физическую систему, взаимодействует с ней и может использоваться для проектирования, мониторинга и оптимизации ее производительности. Также обсуждается применение интегрированных моделей процессов и цифровых двойников в пищевой промышленности в контексте моделирования процессов и планирования производства. Дополнительно рассматриваются проблемы моделирования, возможности и особые характеристики, которые отличают пищевую промышленность от других перерабатывающих отраслей. Потенциальные выгоды от внедрения подхода цифрового моделирования в пищевую промышленность представлены с помощью исследования крупномасштабного пивоваренного завода.

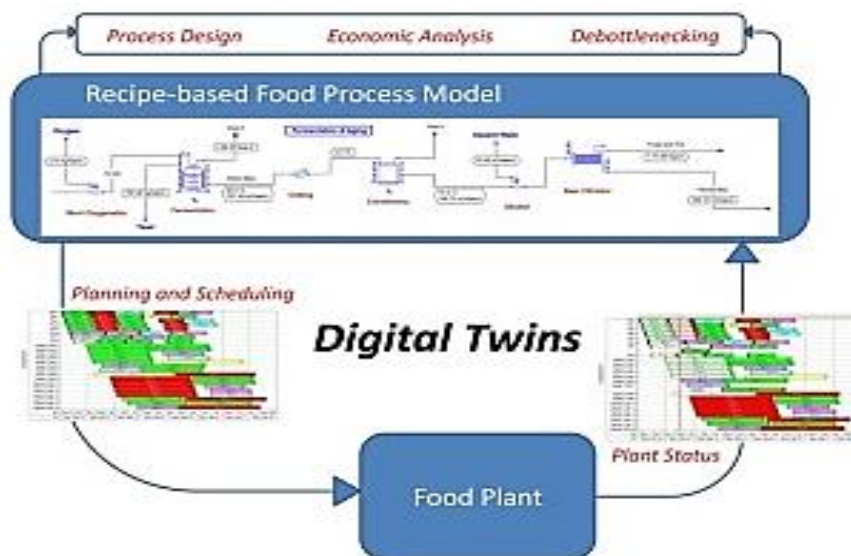


Рисунок 3. Применение моделей процессов и цифровых двойников для моделирования и планирования производства при изготовлении пива

Примечание – составлено автором на основе (Alexandros et al., 2021)

С помощью программы SuperPro Designer (Canizales et al., 2020) были созданы цифровые двойники производственных процессов. Брожение пива длится 5 дней при температуре 22 °С, в результате чего получается пиво с содержанием алкоголя 5 %; 20 % продукции разливается в кеги, остальные 80 % – в стеклянные бутылки объемом 0,5 литра. При новой модели производства, предложенной в статье, пивоварня сможет производить 39 758 000 литров пива в год по сравнению с нынешними 4 670 000 литров. Чтобы полностью использовать потенциал цифровых двойников, необходимо решить проблемы с интеграцией в физические системы и улучшить отраслевую стандартизацию. Улучшение обмена данными между физическими и цифровыми системами также имеет решающее значение для повышения точности моделей и эффективности производства.

Основная цель данной работы – проанализировать современные подходы к использованию цифровых двойников в пищевой промышленности, выявить ключевые технологические тенденции и определить возможные направления дальнейшего развития. Особое внимание уделено интеграции Digital Twin с IoT, искусственного интеллекта (AI) и блокчейн-технологий, которые обеспечивают новые возможности для прогнозирования, контроля и оптимизации производственных процессов.

Основные технологии Digital Twin в пищевой промышленности

Интернет вещей (IoT) и сенсорные технологии

Одним из ключевых компонентов цифрового двойника является система сенсоров, внедренная в производственные линии и складские комплексы. IoT-устройства обеспечивают непрерывный мониторинг параметров окружающей среды, таких как температура и влажность, а также позволяют контролировать состояние оборудования и качество продукции. Например, системы IoT для контроля температуры играют решающую роль в предотвращении порчи продуктов при хранении и транспортировке. Интеграция IoT с Digital Twin создает точные виртуальные модели производственных процессов, используя сенсорные данные для моделирования, прогнозирования и оптимизации условий хранения и работы оборудования.

Искусственный интеллект и машинное обучение

Применение искусственного интеллекта и машинного обучения значительно повышает точность прогнозирования и уровень автоматизации в пищевой промышленности. AI-алгоритмы могут оптимизировать состав рецептур, выявлять дефекты продукции и прогнозировать износ оборудования. Например, анализ данных, поступающих от IoT-сенсоров, позволяет моделям машинного обучения оценивать вероятность отказа оборудования и предотвращать внеплановые поломки. В сочетании с Digital Twin искусственный интеллект в режиме реального времени анализирует производственные процессы и предлагает корректировки для повышения эффективности и снижения рисков простоев. Использование AI и машинного обучения позволяет значительно повысить точность прогнозирования и автоматизации процессов. В пищевой промышленности AI может применяться для оптимизации рецептур, автоматического выявления дефектов продукции, а также предиктивного обслуживания оборудования.

Блокчейн и технологии распределенного реестра (DLT)

Использование блокчейн-технологий в экосистеме Digital Twin позволяет гарантировать безопасность, прозрачность и неизменность данных на всех этапах производства и логистики. Любое изменение в цепочке поставок фиксируется в защищенной системе, что дает возможность всем заинтересованным сторонам отслеживать происхождение и качество продукции. Интеграция технологий распределенного реестра (DLT) с цифровыми двойниками предотвращает подделку данных, минимизирует вероятность ошибок и повышает уровень доверия к системе мониторинга качества продукции.

Аналитика больших данных (Big Data)

В системах Digital Twin для анализа данных и прогнозирования широко применяются алгоритмы машинного обучения. Линейная и логистическая регрессии позволяют выявлять зависимости в данных и анализировать тенденции. Для более сложных задач, таких как поиск аномалий и оптимизация процессов, используются глубокие нейронные сети (DNN). Для точного прогнозирования, например, спроса на продукцию, применяются алгоритмы градиентного бустинга (XGBoost, LightGBM). В задачах кластеризации данных и выявления групп потребителей эффективны методы K-Means и DBSCAN. Если требуется анализ временных зависимостей, например, для предсказания работы оборудования, используются рекуррентные нейронные сети (LSTM, GRU). Эти алгоритмы делают Digital Twin более точным и адаптивным, что особенно важно для промышленного прогнозирования, управления производственными процессами и оптимизации ресурсов.

Применение цифровых двойников в логистике и цепях поставок

Цифровые двойники (Digital Twin) активно применяются в логистике для оптимизации маршрутов поставок, учитывая дорожные условия и погоду. Они помогают предотвращать порчу товаров, контролируя температуру и условия хранения при транспортировке. Кроме того, системы автоматически уведомляют поставщиков о задержках или изменениях в цепочке поставок, что снижает риски сбоев. Крупные ритейлеры, такие как Walmart и Carrefour, уже используют Digital Twin для сокращения издержек и минимизации потерь продукции. Интеграция с искусственным интеллектом (AI) и анализом больших данных (Big Data) позволяет прогнозировать изменения спроса и оперативно адаптировать логистические процессы, обеспечивая бесперебойные поставки товаров.

Результаты

В данном исследовании представлена новая расширенная модель цифрового двойника в режиме реального времени, отличающаяся большей реалистичностью, интерактивностью и функциональностью от традиционных имитационных моделей производства. В ее основе будет лежать концепция бесшовной интеграции: система включает подсистемы имитационного моделирования, оптимизационный модуль, базу данных, подсистему интеллектуального анализа данных и другие компоненты, ключевой особенностью которых является обновление исходных данных и параметров, влияющих на производственные процессы. Основные отличия от существующих решений заключаются в следующем. Имитационная подсистема предназначена для расчета множества характеристик предприятия в условиях различных сценариев. Модуль оптимизации, интегрированный с имитационными моделями, позволяет разрабатывать оптимальные управленческие решения в рамках заданных ограничений. Система хранения данных, представляющая собой базу данных, собирает и обрабатывает актуальную информацию о предприятии, предоставляет входные данные для имитационного моделирования и сохраняет результаты моделирования. Подсистема интеллектуального анализа данных (Data Mining) выполняет анализ взаимосвязей между ключевыми характеристиками информационной модели предприятия, обновляет влияющие факторы и сохраняет результаты анализа. Подсистема визуализации и управления, связанная с имитационными моделями через API или веб-сервисы, обеспечивает доступ к различным функциям моделирования.

Подобный бесшовный подход обеспечивает непрерывную актуализацию имеющихся взаимозависимостей в имитационных моделях предприятия, при этом будут использованы различные методы имитационного моделирования, методы системной динамики, агентного и дискретно-событийного моделирования.

Основная гипотеза этого проекта заключается в том, что можно найти наиболее экономически выгодные методы цифровой трансформации предприятия и создания цифрового двойника для его практического применения. Это должно повысить операционную эффективность и уменьшить время простоя на производственных линиях в пищевой промышленности благодаря мониторингу данных в реальном времени и прогнозному управлению, что позволит своевременно предотвращать или минимизировать возможные операционные сбои.



Рисунок 4. Архитектура системы по технологиям

Примечание – составлено авторами

Анализируя реальные данные с физических устройств, цифровой двойник может предвидеть поведение системы, основываясь на методах машинного обучения. Специально подобранная технология расширяет возможности выявлять паттерны, аномалии, в том числе проектирование с применением технологий CAD/CAM (Alghazzawi, 2016) поможет создать цифровую копию объекта. Использование технологии IoT позволяет организовать передачу данных между реальными и цифровыми реальностями. С помощью алгоритмов и методов машинного обучения цифровой двойник ищет закономерность событий, на анализе данных дает рекомендации по оптимизации и прогнозирует будущие события для предприятий. На данном этапе собрана только цифровая тень, которая работает только в одностороннем порядке. Чтобы разработать полноценный продукт – цифровой двойник, система должна работать с обратной связью. Цифровой двойник может реагировать на физический объект исходя из своих прогнозов, управляя промышленными устройствами с помощью программируемого логического контроллера. Таким образом, цель разработки цифрового двойника – эффективное управление ресурсом, прогнозирование аномалий, оптимизация бережливого производства.

Переход от цифровой тени к полноценному цифровому двойнику осуществляется в несколько этапов. На начальном этапе собираются данные с оборудования без обратного влияния на процессы. Затем интеграция с предиктивной аналитикой и ХАИ позволяет обнаруживать аномалии и прогнозировать возможные сбои. На финальном этапе цифровой двойник становится активным инструментом управления, корректируя процессы в режиме реального времени. Для успешной реализации требуется интеграция IoT, AI, Big Data и облачных технологий, что повышает точность прогнозов, снижает затраты и минимизирует риски.

Заключение

Предложенная модель Digital Twin обладает рядом ключевых преимуществ, которые делают ее эффективным инструментом для трансформации пищевой промышленности. Внедрение цифровых двойников позволяет существенно улучшить контроль качества продукции за счет мониторинга параметров производства в реальном времени, что минимизирует количество брака и отходов. Оптимизация логистики достигается путем моделирования цепочек поставок и прогнозирования спроса, что ведет к снижению затрат на транспортировку и потери продукции. Использование AI-алгоритмов и IoT-сенсоров позволяет внедрять предиктивное обслуживание оборудования, прогнозируя возможные поломки и снижая эксплуатационные расходы. Энергоэффективность производства повышается благодаря точному мониторингу потребления энергии и оптимизации технологических процессов, что сокращает затраты и снижает углеродный след. Использование блокчейн-технологий делает цепочки поставок прозрачными, повышает безопасность данных и предотвращает возможность подделки информации. В перспективе ключевые направления исследований включают разработку облачных Digital Twin-платформ, доступных для малого и среднего бизнеса, усовершенствование AI-алгоритмов для точного прогнозирования дефектов и создание универсальных стандартов интеграции Digital Twin с технологиями IoT, DLT и Big Data для более эффективного управления цифровыми моделями в пищевой промышленности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках научного проекта BR24992975 «Разработка цифрового двойника предприятия пищевой промышленности с применением искусственного интеллекта и технологий ПоТ».

«Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи». «При подготовке данной работы автор(ы) использовали [ChatGPT, ClaudeAI] с целью [языковая обработка данных, ускорение обработки текстов, повышение скорости обзора литературы].

Список литературы

- Jonas L.V., Joel J.P.C. R., Antonio M.A. (2023). Convergence of Distributed Ledger Technologies with Digital Twins, IoT, and AI for fresh food logistics: Challenges and opportunities. *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 31, 100393, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jii.2022.100393>.
- Pratik M., Sachin K., Amine B., Venkatesh M., Ashok P. (2023). Digital twin implementation for performance improvement in process industries - A case study of food processing company. *International Journal of Production Research*. vol. 61, no. 8343-8365, <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2022.2104181>.
- Howard A. (2003). *Data Acquisition Techniques Using PCs*. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-068377-2.X5000-1>.

- Vyacheslav K., Oleg I., Olga M., Sergii S. (2020). Combination of Digital Twin and Artificial Intelligence in Manufacturing Using Industrial IoT. 2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), <http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT50317.2020.9125038>.
- Giovanni P.T., Giuseppe V., Eleonore B. (2022). Integration of Digital Twin, Machine-Learning and Industry 4.0 Tools for Anomaly Detection: An Application to a Food Plant. *Sensors*, vol. 22, no. 4143, <http://dx.doi.org/10.3390/s22114143>.
- Kristina P. S., Miin-Shen Y. (2020). Unsupervised K-Means Clustering Algorithm. 2020 IEEE Access, Institute of Electrical and Electronics Engineers, vol. 8, no. 80716–80727, <https://doi.org/10.1109/access.2020.2988796>.
- Føre, M., Alver, M.O., Alfredsen, J.A., Rasheed, A., Hukkelås, T., Bjelland, H.V., Su, B., Ohrem, S.J., Kelasidi, E., Norton, T., & Papandroulakis, N. (2024). Digital Twins in intensive aquaculture — Challenges, opportunities and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 218, no. 108676, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108676>.
- Naomi A.U., Hsun-Yu L., Shyi-Chyi C., Chin-Chun C., Shih-Syun L., Kai-Xiang Z., Hoang-Yang L., Chih-Yung C., Yi-Zeng H. (2023). Digital twin-based intelligent fish farming with Artificial Intelligence Internet of Things (AIoT). *Smart Agricultural Technology*, vol. 5, no. 100285, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atech.2023.100285>.
- Yang, C.-T., Chen, H.-W., Chang, E.-J., Kristiani, E., Nguyen, K. L. P., & Chang, J.-S. (2021). Current advances and future challenges of AIoT applications in particulate matters (PM) monitoring and control. *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier BV, vol. 419, no. 126442. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126442>.
- Alexandros K., Nikiforos M., Demetri P. (2021). Applications of process and digital twin models for production simulation and scheduling in the manufacturing of food ingredients and products. *Food and Bioprocess Processing* vol. 126, no. 317–333, <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2021.01.016>.
- Canizales, L., Rojas, F., Pizarro, C. A., Caicedo-Ortega, Nelson. H., & Villegas-Torres, M. F. (2020). SuperPro Designer®, User-Oriented Software Used for Analyzing the Techno-Economic Feasibility of Electrical Energy Generation from Sugarcane Vinasse in Colombia. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/pr8091180>.
- Alghazzawi, T.F. (2016). Advancements in CAD/CAM technology: Options for practical implementation. *Journal of Prosthodontic Research*, vol. 60, issue 2, no. 72–84, <https://doi.org/10.1016/j.jpor.2016.01.003>.

Information about authors

Amirkhanova Gulshat – PhD, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: gulshat.aa@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3933-5476, +7 707 636 8078

Kunelbayev Murat – PhD, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: murat7508@yandex.kz, ORCID: 0000-0002-5648-4476, +7 707 829 6748

Tyulepberdinova Gulnur – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: tyulepberdinova@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4322-8983, +7 701 364 5158

Tokhtasyn Miras – Bachelor, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: mirastokhtasyn30@gmail.com, ORCID: 0009-0003-8682-8262, +7 776 278 53 24

Aidynuly Azim – Bachelor, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: azimaidynuly1@gmail.com, ORCID: 0009-0000-0176-5919, +7 777 427 46 45

АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
INFORMATION SYSTEMS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_130
MFTAA 20.15.13

Ә.Ө. Бизақ¹, З.Б. Сайманова², А.Е. Сүлеймен³, Д.Е. Сағатбекова⁴, А.З. Бигалиева⁵
«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ,

Қарағанды қ., Қазақстан

¹E-mail: adilamir2001@gmail.com*

²E-mail: zagira_sb@mail.ru

³E-mail: ai-box@mail.ru

⁴E-mail: dinara.sagatbkova@mail.ru

⁵E-mail: a.bigaliev@kstu.kz

**«ҰЛТТЫҚ САРАПТАМА ОРТАЛЫҒЫНДА» ӨНДІРІСТІК БАҚЫЛАУДЫҢ
АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕСІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ӘЗІРЛЕУ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ
ПРОИЗВОДСТВЕННОГО КОНТРОЛЯ В «НАЦИОНАЛЬНОМ ЦЕНТРЕ ЭКСПЕРТИЗЫ»**

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR PRODUCTION
CONTROL IN THE «NATIONAL CENTER OF EXPERTISE»**

Аңдатпа. Ғылым мен технологияның қарқынды дамуы жағдайында ұйымдардың тиімділігі мен сапасын едәуір жақсарту ажырамас қажеттілікке айналады. Осы тұрғыда «Ұлттық сараптама орталығында» (ҰСО) өндірістік бақылау үшін ақпараттық жүйені зерттеу және әзірлеу өзекті міндет болып табылады. ҰСО Қазақстан Республикасында халықтың денсаулығын қамтамасыз ету үшін қажетті тамақ өнімдерінің, дәрілік заттардың және басқа да тауарлардың сапасын бақылауда шеуші рөл атқарады. Зерттеудің мақсаты ҰСО жұмысының тиімділігін арттыруға және оның қызметкерлерінің еңбек жағдайларын жақсартуға ықпал ететін ақпараттық жүйені әзірлеу және енгізу болып табылады.

Түйін сөздер: ақпараттық жүйе; өндірістік бақылау; Ұлттық сараптама орталығы; сараптама және сапаны бақылау; әзірлеу және енгізу.

Аннотация. В условиях быстрого развития науки и технологий существенное улучшение эффективности и качества деятельности организаций становится неотъемлемой необходимостью. В этом контексте исследование и разработка информационной системы для производственного контроля в «Национальном центре экспертизы» (НЦЭ) представляет собой актуальную задачу. НЦЭ играет ключевую роль в контроле качества пищевой продукции, лекарственных средств и других товаров, необходимых для обеспечения здоровья населения в Республике Казахстан. Цель исследования заключается в разработке и внедрении информационной системы, способствующей повышению эффективности работы НЦЭ и улучшению условий труда ее персонала.

Ключевые слова: информационная система; производственный контроль; Национальный центр экспертизы; экспертиза и контроль качества; разработка и внедрение.

Abstract. In the context of rapid advances in science and technology, significant enhancement of organizational efficiency and quality becomes an essential necessity. Within this framework, the research and development of an information system for production control in the National Centre of Expertise (NCE) represents a pertinent task. The NCE plays a pivotal role in ensuring the quality control of food products, pharmaceuticals, and other goods vital for public health in the Republic of Kazakhstan. The aim of the study is to design and implement an information system aimed at improving the efficiency of NCE operations and enhancing working conditions for its staff.

Keywords: information system; production control; National Centre of Expertise; expertise and quality control; development and implementation.

Kipicne. Ұлттық сараптама орталығы (ҰСО) тамақ өнімдерінің, дәрілік заттардың және денсаулықты қамтамасыз етуге байланысты басқа да тауарлардың сапасын бақылауды жүзеге асырады. ҰСО заңнамаға, халықаралық стандарттарға және өз ережелеріне сәйкес жұмыс істейді. Зерттеудің мақсаты – ұйым жұмысының тиімділігі мен сапасын арттыруға бағытталған ҰСО үшін өндірістік бақылаудың ақпараттық жүйесін әзірлеу.

Зерттеуге шолу. ҰСО-да өндірістік бақылау үшін ақпараттық жүйені әзірлеу және енгізу үшін осы тақырып бойынша қолданыстағы ғылыми және практикалық жұмыстарды зерделеу, негізгі тәсілдер мен әдістерді анықтау, сондай-ақ осы мәселе бойынша ғылыми білімдегі олқылықтар мен кемшіліктерді анықтау қажет. Бұл бөлімде келесі дереккөздер қарастырылады:

Шри-Ланка университетінде Химия зертханасын басқаруға арналған ақпараттық жүйені әзірлеу бойынша диссертация. Бұл жұмыста автор химиялық анализдерді тіркеу, тарату, орындау және есеп беру процестерін автоматтандыруға мүмкіндік беретін ақпараттық жүйенің талаптарын талдау, жобалау, енгізу және тестілеу процесін сипаттайды. Автор сонымен қатар пайдаланушылардың ақпараттық жүйеге тиімділігі мен қанағаттанушылығын бағалау нәтижелерін келтіреді. Бұл дереккөз зертханалық қызметтерге арналған ақпараттық жүйелерді әзірлеу және енгізу әдістемесін зерттеуге, сондай-ақ мүмкіндіктері мен технологиялық шешімдерін ҰСО үшін ұсынылатын ақпараттық жүйемен салыстыруға пайдалы (Thevaguban, 2017).

«Халықтың санитариялық-эпидемиологиялық саламаттылығы туралы» Қазақстан Республикасының Заңы, ол ҰСО-ның тамақ өнімдеріне, дәрілік заттарға, косметикалық бұйымдарға және басқа да объектілерге сараптама жүргізу және олардың сапасын бақылау жөніндегі мемлекеттік орган ретіндегі қызметін реттейді. Бұл көзде ҰСО-да өндірістік бақылауды ұйымдастыруға және жүргізуге, сондай-ақ бақылау нәтижелері бойынша есептіліктің мазмұны мен нысанына қойылатын нормативтік талаптар бар. Бұл дереккөз ҰСО үшін ақпараттық жүйені әзірлеу және енгізу кезінде құқықтық негіздер мен шектеулерді анықтау үшін маңызды (Парламент Республики Казахстан, 2020).

Мектепке дейінгі мекемеде санитарлық-гигиеналық жағдайларды қамтамасыз ету бойынша іс-шаралар жиынтығы болып табылатын балабақшаға арналған өндірістік бақылау бағдарламасы. Бұл бағдарлама мақсаттарды, міндеттерді, объектілерді, әдістерді, кезеңділікті, жауапты тұлғаларды және өндірістік бақылау нәтижелерін сипаттайды. Бұл дереккөз белгілі бір объектіде өндірістік бақылауды практикалық қолдану мысалын зерттеу үшін, сондай-ақ бақылау объектілерінің әртүрлі түрлерінің ерекшеліктері мен қажеттіліктерін анықтау үшін қызықты (Сафьянова, 2022).

Өндірістің технологиялық дайындығының негізгі ұғымдарын, міндеттерін, кезеңдері мен әдістерін қарастыратын «өндірістің технологиялық дайындығы» тақырыбындағы дәріс. Бұл дәріс сонымен қатар автоматтандырылған жобалау жүйелері, өндірісті басқару жүйелері, деректерді жинау және өңдеу жүйелері сияқты өндірісті технологиялық дайындау үшін ақпараттық технологияларды қолдану мысалдарын келтіреді. Бұл дереккөз өндірісті технологиялық дайындаудың теориялық негіздері мен принциптерін түсінуге, сондай-ақ осы салада ақпараттық технологияларды қолдану мүмкіндіктері мен перспективаларын талдауға пайдалы (Граничин & Кияев, n.d.).

Джонсон Ву (2023) Өндірісті басқарудың ақпараттық жүйелері (MIS): анықтамасы, функциялары және мысалдары өндірістік процестердегі басқарудың ақпараттық жүйелерінің рөліне толық шолу жасайды. Жұмыста MIS эволюциясы, оның функциялары мен артықшылықтары, соның ішінде нақты уақытта шешім қабылдауды қамтамасыз ету, ресурстарды оңтайландыру және өнім сапасын жақсарту сипатталған. Автор заманауи өндіріс жағдайында жүйенің маңыздылығын атап көрсетеді және мұндай жүйені енгізудің артықшылықтары мен ықтимал қиындықтарын көрсетеді (Vu, 2023).

Халықаралық тәжірибеде енгізілген ұқсас ақпараттық жүйелерге шолу. ЕО-дағы автоматтандырылған бақылау жүйелері Еуропалық Одақтағы сапаны бақылаудың негізгі жүйелерінің бірі – Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF) (European Commission, n.d.). Бұл жүйе ЕО елдері арасында тамақ өнімдері мен жемге байланысты қауіптер туралы жедел ақпарат алмасу үшін құрылған. RASFF ерекшеліктері: химиялық ластануды, биологиялық қауіптерді және таңбалаудың сәйкессіздігін қоса алғанда, қауіпсіздік стандарттарының бұзылуын тез тіркеуге мүмкіндік береді; жүйе ұлттық реттеушілерден деректерді орталықтандырылған түрде жинайды және ақпаратты желінің барлық мүшелеріне таратады; қауіп-қатерлерге жауап беру уақытын азайту қамтамасыз етіледі, бұл тұтынушылар үшін ықтимал тәуекелдерді болдырмай, өнімді айналымнан тез алуға мүмкіндік береді.

АҚШ-тағы зертханаларды басқару жүйелері Зертханалық процестерді автоматтандырудың тиімді тәсілінің мысалы ретінде тағы Laboratory Information Management System (LIMS) жатады (LIMS, n.d.). Бұл жүйе аналитикалық зерттеулермен айналысатын зертханаларда кеңінен қолданылады. LIMS мүмкіндіктері: сынамаларды тіркеу, талдауларды жоспарлау, есептерді қалыптастыру және деректерді сақтау процестерін автоматтандыру; зерттеу нәтижелерін автоматты түрде жүктеу үшін аналитикалық жабдықпен интеграциялау; халықаралық талаптарға сәйкестікті қамтамасыз ететін GLP (Good Laboratory Practice) сияқты стандарттарды қолдау (Верников, 2000).

Бұл жүйелерді салыстыру олардың келесі аспектілерде жоғары өнімділігін көрсетеді: ЕО-да RASFF енгізу анықталған бұзушылықтарға жауап берудің орташа уақытын бірнеше аптадан бірнеше күнге дейін қысқартты (Kowalska & Manning, 2020); LIMS жүйесіндегі процестерді автоматтандыру деректерді қолмен енгізуге байланысты қателерді 30-50 %-ға азайтты; жабдықты біріктіру және цифрландыру деректерді өңдеу және тасымалдау шығындарын азайтуға, сондай-ақ қызметкерлерге жүктемені азайтуға мүмкіндік берді (European Commission, 2023).

Зерттеулерді талдауға сүйене отырып, ҰСО-да өндірістік бақылау үшін ақпараттық жүйені әзірлеу осы саладағы терең ғылыми зерттеулер мен мол тәжірибеге сүйенеді деген қорытындылауға болады (National Center for Expertise, n.d.).

Зерттеу әдістері. Осы зерттеу шеңберінде ҰСО-да өндірістік бақылау үшін ақпараттық жүйені әзірлеуге назар аудара отырып, Қазақстан Республикасындағы сараптама және бақылау саласындағы заңнамалық нормалар мен талаптарға талдау жүргізілді. Талдау әртүрлі аспектілерге, соның ішінде сараптама әдістемесіне, сараптамалық процестерге қойылатын талаптарға және құжаттамаға бағытталған.

Ұлттық сараптама орталығында (ҰСО) өндірістік бақылаудың ақпараттық жүйесін (АЖ) сәтті енгізу үшін бар проблемаларды тиімді шешу және бақылау процестерінің өнімділігін арттыру үшін бірнеше негізгі аспектілерді ескеру қажет. Ағымдағы қиындықтарды талдау автоматтандырылған хаттамалар мен есептердің болмауы, стандарттар мен нормативтерді өз бетінше іздеу қажеттілігі, жүйеге ұзақ жүктеме және шектеулі функционалдылық сияқты мәселелерді анықтады. Бұл факторлар ҰСО жұмысының тиімділігіне теріс әсер етеді.

Осы қиындықтарды жеңу үшін келесі бағыттарға назар аудару керек:

1. АЖ енгізу әдістемесі. Agile немесе Scrum сияқты икемді әзірлеу әдістемелерін пайдалану АЖ-ны ұйымның өзгеретін қажеттіліктеріне тез бейімдеуге мүмкіндік береді. Бұл әсіресе заңнамадағы өзгерістер немесе сапа стандарттарына қойылатын талаптар тұрғысынан маңызды (Miozza et al., 2024).

2. АЖ-ны сәтті қолдану мысалдары. Көптеген жетекші компаниялар қазірдің өзінде ұқсас жүйелерді қолданады. Мысалы, жасанды интеллект (AI) негізіндегі сапаны басқару жүйелері фармацевтикалық корпорацияларда өнімнің стандарттарға сәйкестігін бақылауды автоматтандыру үшін енгізілген. Мұндай жүйелер тексеру процесін жылдамдатып

кана қоймай, қателіктердің ықтималдығын азайтады (Koenigsberg & Tscheligi, 2012; Ait-El-Cadi et al., 2021).

3. Қолданыстағы платформалармен интеграция. Жұмыс тиімділігін арттыру үшін АЖ ERP жүйелері, CRM, стандарттардың дерекқорлары сияқты бұрыннан бар құралдармен біріктірілуі керек. Бұл ақпаратты орталықтандырылған басқаруды қамтамасыз етеді және операциялардың қайталануын азайтады.

4. Қызметкерлерді оқыту кезеңдері. АЖ енгізудің маңызды құрамдас бөлігі қызметкерлерді оқыту болып табылады. Бұл жаңа жүйемен жұмыс істеуді ғана емес, сонымен қатар автоматтандырудың артықшылықтарын түсінуді де қамтиды. Тренингтерді ұйымдастыру және пайдаланушы нұсқауларын әзірлеу қызметкерлерді бейімдеуді айтарлықтай жеңілдетеді.

5. Іске асырудың экономикалық тиімділігі. АЖ пайдалану шығындары мен пайдасын талдау шешім қабылдау процесінде шешуші рөл атқарады. Жүйені енгізу қолмен жұмыс істеу шығындарының төмендеуіне, қателерді азайтуға және өндірістік бақылау процестерін жеделдетуге әкелуі керек (ACN, 2023; Liu et al., 2025).

ҰСО-да өндірістік бақылау жүйесі үшін құжаттаманы автоматтандыру, стандарттар дерекқорын интеграциялау, жүйені оңтайландыру, заңнамалық сәйкестік, ақпараттық қауіпсіздік, мониторинг, икемділік және қызметкерлерді оқыту аспектілерін ескеру қажет.

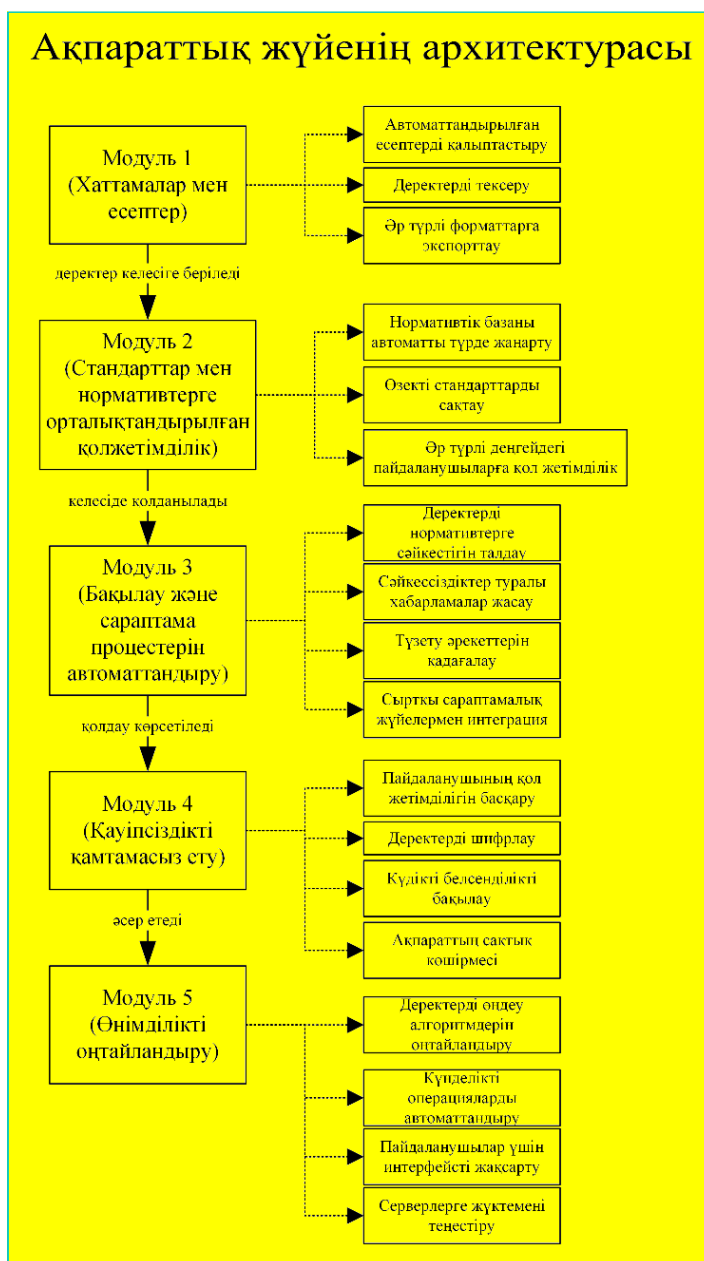
Өндірістік бақылауға арналған ақпараттық жүйе екі блоктан тұрады: деректерді өңдеуді автоматтандыратын хаттамалар, есептер, мониторинг және талдау құралдары және процестерді жетілдіруге бағытталған бақылау, интеграция және сәйкестікті қадағалау жүйелері (1-сурет).



1-сурет. Ақпараттық жүйенің концепциясы

Ескерту – автормен құрастырылған

Жүйе оның мүмкіншіліктерін кеңейту үшін икемді конфигурациялауға және әртүрлі модульдерге бөлуге мүмкіндік беретін модульділікті ескере отырып жасалады. Сонымен қатар, құпия ақпараттың қауіпсіздігіне кепілдік беретін аутентификация және шифрлау құралдары енгізілді. Деректерді жүктеу мен өңдеудің жоғары жылдамдығын қамтамасыз ететін технологиялық платформа таңдалды. Ақпараттық жүйенің архитектурасы 2-суретте көрсетілген.

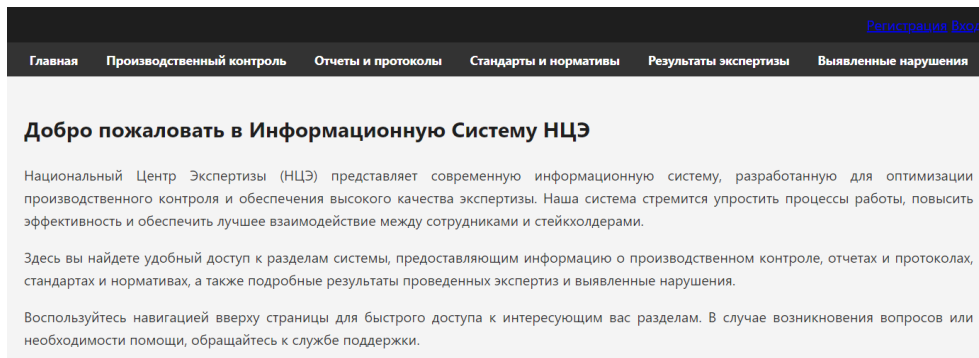


2-сурет. Ақпараттық жүйенің архитектурасы

Ескерту – автормен құрастырылған

ҰСО үшін ақпараттық жүйені жобалау және іске асыру. ҰСО ақпараттық жүйесінің басты беті – бұл қызметкерлерге барлық қажетті мәліметтер мен ресурстарға тікелей қол жеткізуге мүмкіндік беретін интуитивті қол жетімділік пен жұмыс істеу қағидаларын ескере отырып жасалған интерфейс. Кіру және тіркеу механизмдері жүйеге кіру кезінде қауіпсіздік пен ыңғайлылықты қамтамасыз ету мақсатында интерфейсін жоғарғы оң жақ бұрышында жүзеге асырылады. Бұл жүйенің негізгі мақсаты өндірістік бақылау процестерін оңтайландыру және жүргізілетін сараптамалар сапасының жоғары стандартын қамтамасыз ету болып табылады (Wu, Sun, & Fan, 2021). Әр түрлі бөлімдер,

соның ішінде өндірістік бақылау, есептер мен хаттамалар, стандарттар мен нормативтер қажетті ақпаратты іздеуді және оларға қол жеткізуді айтарлықтай жеңілдетеді. Жүйенің басты беті 3-суретте көрсетілген.



3-сурет. Ақпараттық жүйенің басты беті

Ескерту – автормен құрастырылған

ҰСО-ның ақпараттық жүйесіндегі «өндірістік бақылау» беті қызметкерлерге Қазақстан аумағындағы ұйымдардың қызметін мониторингілеу және талдау үшін ыңғайлы құрал ұсынады. Бет интерфейсі ақпаратты тиімді басқаруды қамтамасыз ететін фильтрлер мен іздеуді қамтиды (4-сурет).

Название	Адрес	Владелец	Тип	Контакты	Документы	Проверка	Выявленные нарушения
АО 'Казахстанская нефтяная компания'	г. Алматы, ул. Толе би, 123	Иванов Иван Иванович	Производство	8 (701) 123-45-67	Свидетельство о регистрации	Ежегодная проверка	2
ТОО 'ТехноСтрой'	г. Нур-Султан, пр. Республики, 56	Смирнов Сергей Андреевич	Строительство	8 (702) 987-65-43	Лицензия на строительные работы	Квартальная проверка	0
ИП 'Грузовичкова Елена Сергеевна'	г. Атырау, ул. Сатпаева, 78	Грузовичкова Елена Сергеевна	Услуги	8 (705) 321-54-76	Идентификационный номер	Ежегодная проверка	1
ООО 'Эко-Техника'	г. Караганда, ул. Жамбыла, 34	Петров Петр Петрович	Экология	8 (701) 111-22-33	Сертификат о соответствии	Ежеквартальная проверка	4
ТОО 'ТехноЛогистика'	г. Алматы, ул. Фурманова, 87	Иванов Александр Александрович	Транспорт и логистика	8 (707) 444-55-66	Лицензия на грузоперевозки	Полугодовая проверка	1
ИП 'Креативный Мастер'	г. Ақтобе, ул. Абая, 12	Абдулова Камила Муратовна	Искусство и ремесла	8 (705) 888-99-00	Свидетельство об индивидуальной предпринимательской	Ежеквартальная проверка	0

4-сурет. «Өндірістік бақылау» беті

Ескерту – автормен құрастырылған

Бетте ұйымдардың деректері, олардың атауы, мекен-жайы, иесі, қызмет түрі, байланыс деректері, құжаттар, тексеру нәтижелері және анықталған бұзушылықтар саны көрсетілген кесте берілген. Сүзгілер қызметкерлерге бұзушылықтардың түрі, атауы және саны бойынша ұйымдарды таңдауға мүмкіндік береді, бұл шарлауды және қажетті ақпаратты табуды айтарлықтай жеңілдетеді (Oluwole, Mulder, & Adebisi, 2022).

«Стандарттар мен нормативтер» беті әртүрлі елдерде қабылданған стандарттар мен нормативтер туралы ақпаратқа оңай қол жеткізуге және талдауға арналған интеграцияланған жүйе болып табылады. Пайдаланушылар деректерді стандарт түрі, қолдану аясы, стандарттың бекітілген күні мен нормасы бойынша сүзе алады және кілт сөздерді іздей алады (Liu,

Yang, & Feng, 2023). Навигациялық тақта жүйенің басқа бөлімдеріне, соның ішінде басты бетке, өндірістік бақылау бөлімдеріне, есептер мен хаттамаларға, сараптама нәтижелеріне және анықталған бұзушылықтарға жылдам қол жеткізуге мүмкіндік береді (5-сурет).

Тип	Сфера применения	Дата утверждения	Норма стандарта	Единица измерения
ЕС	Продукты питания	2022-03-10	ЕС 12345-1:2022	кг
ЕС	Энергетика	2022-02-20	ЕС 67890-2:2022	МВт
Америка	Информационные технологии	2022-04-05	ANSI/IEEE 802.11:2022	бит/с
Америка	Строительство	2022-03-15	ASTM C33:2022	м³
Кавказстан	Безопасность продукции	2022-01-25	ST RK ISO 9001:2022	ед.
Кавказстан	Экология	2022-02-28	ST RK ISO 14001:2022	тонн

5-сурет. «Стандарттар және нормативтер» беті

Ескерту – автормен құрастырылған

Нәтижелері және оларды талқылау Бұл бөлімде ҰСО ақпараттық жүйесінің өнімділігін, атқаратын функцияларын және жалпы сапасын талдау нәтижелері келтірілген. Өнімділікті бағалау жауап беру уақыты мен сұраныстарды өңдеу жылдамдығын өлшеуді қамтыды. Өзара әрекеттесу интерфейсі мен міндеттерді жүзеге асыруды қоса алғанда, жүйенің жұмыс істеу мүмкіншіліктеріне толық бағалау жүргізілді. Кодтың сапасын талдау ықтимал проблемаларды анықтады және қауіпсіздікті бағалау осалдықтарды анықтады. Пайдаланушылардың пікірлері қанағаттану мен жақсарту бағыттарын анықтау үшін пайдаланылды. Сенімділікті бағалау сәтсіздіктерді қалпына келтіру сынақтарын қамтыды және пайдаланушы тәжірибесін жақсарту қосымша өзгерістерді қажет етті. Мұндай талдаулар рентабельділік салалары мен жақсарту бағыттарын анықтады.

Қорытынды. Стандарттар мен нормативтерді басқарудың ақпараттық жүйесін талдау негізінде келесі қорытындыларды жасауға болады. Жүйені тестілеу және күйін келтіру процесі зейін мен жүйеліліктің жоғары деңгейімен жүргізілді, бұл қосымша жетілдіруді қажет ететін кейбір функционалдық ерекшеліктерді анықтады. АЖ негізгі талаптарды сәтті орындағанымен, максималды тиімділікке қол жеткізу үшін іздеу процестерін сүзу мен оңтайландыруды жақсарту және деректерді егжей-тегжейлі талдау үшін жүйенің қызмет аясын кеңейту қажет. Пайдаланушы интерфейсі интуитивті және пайдаланудың қарапайымдылығын қамтамасыз етеді. Дегенмен, стандарттар мен нормативтердің өзгеруін ескере отырып, жүйені үнемі жаңартып отыру керек. Бұл ақпараттық жүйе өнімнің сапасы мен қауіпсіздігін бақылауды тиімдірек ететін маңызды қадам.

Әдебиеттер тізімі

- Thevaruban, K. (2017). Chemistry laboratory management system (Master's thesis, University of Colombo School of Computing). University of California Santa Cruz. https://dl.ucsc.cmb.ac.lk/~jspui/bitstream/123456789/4098/1/Final%20Thesis_ChemistryLaboratoryManagementSystem.pdf
- Парламент Республики Казахстан. (2020). О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения (№ 21854). <https://adilet.zan.kz/rus/docs/K2000000360>
- Сафьянова, Т. В. (2022). Программа производственного контроля для детского сада. National School Portal. <https://nsportal.ru/detskiy-sad/upravlenie-dou/2022/08/16/programma-proizvodstvennogo-kontrolya-dlya-detskogo-sada>
- Граничин, О., & Кияев, В. (n.d.). Лекция №24014: Технологическая готовность производства. Intuit. <https://intuit.ru/studies/courses/944/1259/lecture/24014>

- Vu, J. (2023). Manufacturing management information systems (MIS): Definition, functions and examples. <https://johnsonvu.com/en/production-management-information-systems/>
- European Commission. (n.d.). Rapid Alert System for Food and Feed (RASFF). https://food.ec.europa.eu/safety/rasff-food-and-feed-safety-alerts_en
- LIMS. (n.d.). Laboratory Information Management System. <https://www.limsforum.com/laboratory-information-management-system-lims/>
- Верников, Г. (2000). Технологическая эволюция корпоративных информационных систем. http://www.citforum.ru/cfin/articles/kis_xml.shtml#1
- Koenigsberg, A., & Tscheligi, M. (2012). The impact of health technology assessment reports on decision making in Austria. https://www.researchgate.net/publication/221736970_The_impact_of_health_technology_assessment_reports_on_decision_making_in_Austria
- National Center for Expertise. (n.d.). Production control services. <https://nce.kz/services/production-control/>
- European Commission. (2023). New Health Challenges and Epidemic Control. https://ec.europa.eu/newsroom/sante/items/847722/en?utm_source=chatgpt.com
- ACN. (2023). Contaminated Food and Food Fraud in the EU. <https://www.foodtimes.eu/food-system-en/contaminated-food-and-food-fraud-in-the-eu-acn-report-2023/>
- Kowalska, A., & Manning, L. (2020). Using the rapid alert system for food and feed: potential benefits and problems on data interpretation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(6), 906–919. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10408398.2020.1747978>
- Oluwole, O., Mulder, N., & Adebisi, E. (2022). The Implementation of Laboratory Information Management System in Multi-Site Genetics Study in Africa: The Challenges and Up-Scaling Opportunities. *Frontiers in Genetics*, 13, 864123. https://www.researchgate.net/publication/364646686_The_Implementation_of_Laboratory_Information_Management_System_in_Multi-Site_Genetics_Study_in_Africa_The_Challenges_and_Up-Scaling_Opportunities
- Wu, L., Sun, D., & Fan G. (2021). Laboratory information management system for biosafety laboratory: Safety and efficiency. *Journal of Biosafety and Biosecurity*, 3(2), 85–90. https://www.researchgate.net/publication/351827389_Laboratory_information_management_system_for_biosafety_laboratory_Safety_and_efficiency
- Liu, Q., Yang, K., & Feng, S. (2023). Application of LIMS: Laboratory Information Management System in Testing Laboratory. https://www.researchgate.net/publication/378701142_Application_of_LIMS_laboratory_information_management_system_in_testing_laboratory
- Liu, C., Abadi, M.M. K.F., Zhang, M., Hu, Y., & Xu, Y. (2025). Leveraging AI for energy-efficient manufacturing systems: Review and future perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612524002711>
- Miozza, M., Brunetta, F., & Appio, F. P. (2024). Digital transformation of the Pharmaceutical Industry: A future research agenda for management studies. *Technological Forecasting and Social Change*, 207. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162524003767>
- Ait-El-Cadi, A., Gharbi, A., Dhoub, K., & Artiba, A. (2021). Integrated production, maintenance and quality control policy for unreliable manufacturing systems under dynamic inspection. *International Journal of Production Economics*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092552732100116X>

Information about authors

Bizak Adilamir – Bachelor in Information and Communication Technologies, master student, NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, Karaganda, Kazakhstan. E-mail: adilamir2001@gmail.com, ORCID: 0009-0007-0897-4060, +7 706 690 04 20

Saimanova Zagira – PhD, acting associate professor, NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, department of «Information computing systems», Karaganda, Kazakhstan. E-mail: zagira_sb@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2170-1466, +7 777 610 07 57

Suleimen Ainur – senior lecturer, NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, department of «Information computing systems», Karaganda, Kazakhstan. E-mail: ai-box@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5408-9448, +7 7012888727

Sagatbekova Dinara – teacher, NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, department of «Information computing systems», Karaganda, Kazakhstan. E-mail: dinara.sagatbkova@mail.ru, ORCID: 0000-0002-8991-1999, +7 7073030415

Bigaliyeva Alfiya – PhD, acting associate professor, NPJSC “Abylkas Saginov Karaganda Technical University”, department of «Department of Information Technology and Security», Karaganda, Kazakhstan. E-mail: a.bigaliyeva@kstu.kz, ORCID: 0000-0002-0136-5402, +7 7003048249

АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІК
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
INFORMATION SECURITY

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_138
IRSTI 81.93.29

D.M. Zhaksibek¹, Zh.Zh. Akhmetova¹, P. Popov², B.A. Serimbetov³

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

E-mail: zhaksibek.dias@icloud.com

E-mail: zaigura@mail.ru*

²City University London, London, UK

E-mail: p.t.popov@city.ac.uk

³Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov,

Astana, Kazakhstan

E-mail: sba_rmmc@mail.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF RANSOMWARE DECRYPTION METHODS

**БОПСАЛАУШЫ-БАҒДАРЛАМАНЫҢ ШИФРЫН ШЕШУ ӘДІСТЕРІНІҢ
САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ**

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДЕШИФРОВАНИЯ
ПРОГРАММ-ВЫМОГАТЕЛЕЙ**

Abstract. Ransomware is one of the most serious cybersecurity threats, as it can have a devastating impact on private users, businesses and government agencies alike. This survey paper analyses current ransomware decryption techniques, which include approaches such as brute-force, vulnerability analysis, specialised decryptors and machine learning techniques. The aim of the study is to provide a comprehensive analysis of existing methods to determine their effectiveness, resource costs and limitations.

Particular attention is given to methods utilising artificial intelligence due to their significant potential in improving decryption efficiency and developing adaptive solutions. The analysis shows that machine learning and AI can significantly accelerate vulnerability detection and improve decryption accuracy. The results of the study highlight the importance of leveraging these advanced technologies to better protect systems from threats posed by ransomware.

The practical relevance of the paper is that it provides cybersecurity professionals with valuable insights into the selection of appropriate defence techniques and possible ways to improve them. The article also reveals directions for future research, focusing on the need to develop more versatile and effective defence tools. The authors demonstrate that integrating new technologies into existing approaches can significantly reduce risks and increase the resilience of systems. Thus, the presented material contributes to the knowledge and understanding of modern decryption techniques and their role in combating ransomware, making it an important contribution to the development of the industry.

Keywords: Ransomware, encryption, decryption, artificial intelligence, machine learning.

Аңдатпа. Бопсалаушы-программалар киберқауіпсіздік саласындағы ең үлкен қауіптердің бірі болып табылады, өйткені олар жеке пайдаланушыларға, кәсіпорындарға және мемлекеттік мекемелерге айтарлықтай зиян келтіруі мүмкін. Осы шолу мақаласы бопсалаушы-программаларды дешифрлаудың заманауи әдістерін талдауға арналған, оған парольдерді таңдау (brute-force), осалдықтарды талдау, арнайы дешифраторларды пайдалану және машиналық оқыту технологияларын қолдану сияқты әдістер кіреді.

Зерттеудің мақсаты – қолданыстағы әдістерді олардың тиімділігін, ресурстар шығындарын және шектеулерін анықтау үшін жан-жақты талдау.

Жасанды интеллектті қолданатын әдістерге ерекше назар аударылады, себебі олардың дешифрлау тиімділігін арттыруда және бейімделгіш шешімдерді жасауда айтарлықтай әлеуеті бар. Талдау машиналық оқыту мен ЖИ осалдықтарды анықтау үдерісін едәуір жеделдетіп, дешифрлау дәлдігін арттыра алатынын көрсетеді. Зерттеудің нәтижелері бұл озық технологияларды жүйелерді бопсалаушы-программалардан туындайтын қауіптерден қорғауды жақсарту үшін пайдаланудың маңыздылығын айқындайды.

Мақаланың практикалық маңыздылығы – ол киберқауіпсіздік саласындағы мамандарға қорғау әдістерін таңдау және оларды жетілдіру жолдары туралы құнды мәліметтер береді. Мақала сондай-ақ болашақ зерттеулерге бағыттар көрсетіп, әмбебап және тиімді құралдарды әзірлеу қажеттілігіне назар аударады. Авторлар жаңа технологияларды қолданыстағы әдістерге біріктіру жүйелердің тәуекелдерін айтарлықтай төмендетіп, олардың тұрақтылығын арттыра алатынын дәлелдейді. Осылайша, ұсынылған материал бопсалаушы-программалармен күресте қазіргі дешифрлау әдістерінің рөлі мен маңыздылығын түсінуді тереңдетуге ықпал етеді, бұл оны саланың дамуына маңызды үлес етеді.

Түйін сөздер: Бопсалаушы-программалар, шифрлау, дешифрлау, жасанды интеллект, машиналық оқыту.

Аннотация. Программы-вымогатели представляют одну из самых серьезных угроз в области кибербезопасности, поскольку они могут нанести разрушительное воздействие как на частных пользователей, так и на предприятия и государственные учреждения. Данная обзорная статья посвящена анализу современных методов дешифрования программ-вымогателей, которые включают такие подходы, как перебор паролей (brute-force), анализ уязвимостей, применение специализированных дешифраторов и использование технологий машинного обучения. Целью исследования является предоставление всестороннего анализа существующих методов для определения их эффективности, затрат ресурсов и ограничений.

Особое внимание уделено методам, использующим искусственный интеллект, благодаря их значительному потенциалу в повышении эффективности дешифрования и разработке адаптивных решений. Анализ показывает, что машинное обучение и ИИ могут существенно ускорить процесс выявления уязвимостей и повысить точность дешифровки. Результаты исследования подчеркивают важность использования этих передовых технологий для повышения защиты систем от угроз, исходящих от программ-вымогателей.

Практическая значимость статьи заключается в том, что она предоставляет специалистам в области кибербезопасности ценные сведения о выборе подходящих методов защиты и возможных путях их совершенствования. Статья также раскрывает направления для будущих исследований, акцентируя внимание на необходимости разработки более универсальных и эффективных инструментов защиты. Авторы демонстрируют, что интеграция новых технологий в существующие подходы способна значительно снизить риски и повысить устойчивость систем. Таким образом, представленный материал способствует углублению знаний и пониманию современных методов дешифрования и их роли в борьбе с программами-вымогателями, что делает его важным вкладом в развитие отрасли.

Ключевые слова: Программы-вымогатели, шифрование, дешифрование, искусственный интеллект, машинное обучение.

Introduction. Ransomware is a type of malicious software that encrypts user data, making it inaccessible, and demands a ransom for its restoration. In recent years, it has become one of the most serious and widespread cyber threats, causing significant damage to individuals and organizations of various scales.

The consequences of ransomware attacks go beyond the financial losses associated with ransom payments. Victims face business process disruptions, loss of critical data, and reputational damage, which can have long-term negative effects (Shaukat, S. & Ribeiro B., 2020).

Literature review. The relevance of research into ransomware decryption techniques stems from the growing threat of ransomware to users and organisations around the world. The number of ransomware incidents increases every year, and the consequences of such attacks can be catastrophic, including loss of confidential data, financial losses and reputational risks. The difficulty of decrypting such programs is caused by the use of complex cryptographic algorithms, which requires the development of new methods and technologies to analyse them (Ahmad, A., Webb, J., Desouza, K. C., & Boorman J., 2019).

Despite active research in the field of ransomware decryption, there are a number of shortcomings in methodologies and research gaps (Retrieved from <https://www.cisa.gov/ransomware>):

– Limitations of universal solutions. One of the main drawbacks of existing methods is their limited applicability to different types of ransomware. Each new virus may use unique ciphers and defence mechanisms, making it difficult to create universal decryption tools.

– Lack of open data. Many decryption methods depend on public repositories that store encryption keys. However, these repositories are not always complete, and many cybercriminals use methods that leave no trace for later analysis.

– Lack of a comprehensive approach. Research often focuses on narrow aspects of decryption (e.g. decrypting one particular virus), but does not always consider the need for a comprehensive approach that includes both technical and organisational security measures to prevent attacks.

– Problems with machine learning. Although machine learning techniques are advancing in the analysis of ransomware, these techniques have limited effectiveness because many programs use dynamic encryption techniques and also attempt to hide their actions from analysis (Retrieved from <https://www.europol.europa.eu/media-press/newsroom/news/no-more-ransom-celebrates-five-years-of-stopping-ransomware>).

Materials and methods of research. To understand how an attacker (such as the author of a ransomware) uses symmetric and asymmetric encryption, we need to look at a typical ransomware scheme and the ways in which they block access to data by demanding a ransom (Figure 1).

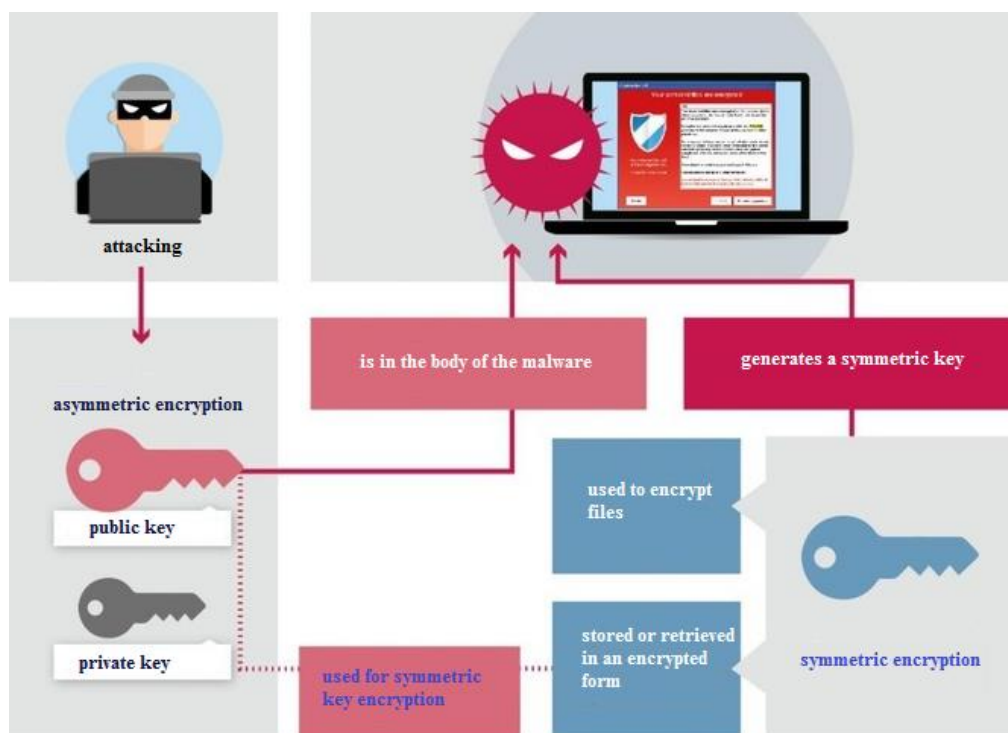


Figure 1. A schematic of how symmetric and asymmetric encryption works, which is used in encryptors (Note – compiled by the authors on the basis of the source: https://www.trendmicro.com/ru_ru/what-is/ransomware.html)

Typically, ransomware combines two types of encryption to achieve its goal: symmetric (to encrypt data) and asymmetric (to protect the decryption key) (Mora S., Bongiovanni G., Giacinto G., & Perdisci R., 2020).

1. Introduction and initial phase of the attack

Malware distribution: The attacker injects the encryptor onto the victim's device via phishing emails, malicious links, software vulnerabilities, or remote access.

Initial launch phase: After infiltration, the encryptor begins scanning the victim's system for data that can be encrypted and selects files based on a predefined algorithm (Al-Rimy B.A.S., Maarof M.A., & Shaid S.Z. M., 2018).

2. Generating a symmetric key to encrypt the data

Symmetric key generation: A random symmetric key (e.g. for AES encryption) is created on the victim's device. This key will be used to encrypt all data.

Data encryption using symmetric key: The encryptor applies a symmetric key to quickly encrypt all detected files. Symmetric encryption (e.g. AES) is used because of its speed and efficiency in encrypting large amounts of data (Azmoodeh, A., Dehghantanha, A., Choo, K. K. R., & Conti, M., 2018).

3. Using asymmetric encryption to protect the symmetric key

Symmetric key encryption: Once the data is encrypted, the symmetric key itself becomes critical for file recovery. The attacker uses asymmetric encryption (e.g. RSA) to encrypt the symmetric key. The RSA public key used to encrypt the symmetric key is pre-embedded in the malware code and known only to the attacker (Li, Y., & Guo, L., 2019).

Removing the symmetric key from memory: Once the symmetric key is encrypted and stored in encrypted form, the original unencrypted key is removed from the memory of the victim's system. This makes it impossible to decrypt the data without accessing the attacker's private key, which is stored on the attacker's side.

4. Ransom notice and demand

Creating a ransom message: The encryptor displays a ransom message to the victim stating that her files are encrypted and a private key is required to regain access. This message usually includes instructions on how to pay the ransom (e.g., in cryptocurrency) and possible ways to contact the attacker (Retrieved from <https://www.nomore ransom.org>).

Promise of decryption: The attacker states that after receiving payment, he will provide a private key or decrypter that will allow the files to be recovered. This key is needed to decrypt the encrypted symmetric key and then, using the symmetric key, return the data to its original state.

5. Decryption (after paying the ransom)

If the victim agrees to the terms and pays the ransom, the attacker can provide the victim with the private key or a special decryption software (Asghar M.R., Habib S., & Javed M.Y., 2020). In this case:

Symmetric key decryption: First, the victim uses the provided private key to decrypt the symmetric key.

Data decryption: The symmetric key is then used to decrypt the encrypted data, restoring it to its original state.

Reasons for choosing a combination of symmetric and asymmetric encryption

Speed and efficiency: Symmetric encryption such as AES is much faster, allowing large amounts of data to be encrypted in a short period of time.

Key Security: Asymmetric encryption protects the symmetric key because the private key to decrypt it is stored with the attacker. This minimises the risk of the victim being able to obtain the symmetric key without ransom.

This combined scheme of working with symmetric and asymmetric encryption allows the encryptor to achieve maximum efficiency and security. The victim cannot decrypt his data without access to the private key, which is controlled by the attacker, and at the same time the encryption process is fast due to the use of the symmetric key (Shaukat S., & Ribeiro B., 2018).

Therefore, the development of effective methods for ransomware decryption is becoming increasingly important. The ability to restore access to encrypted data without paying the ransom reduces the motivation of attackers and helps decrease the prevalence of such attacks (Vinayakumar, R., et al., 2019).

The purpose of this article is to conduct a comparative analysis of various ransomware decryption methods, identify their advantages and limitations, and discuss the prospects for using artificial intelligence to enhance the effectiveness of these methods.

Results and their discussion

Approaches to Ransomware Decryption:

1. Brute-force Method. The brute-force method is based on systematically trying all possible decryption key combinations until the correct one is found (Sgandurra D., & Lupu E. C., 2016). This approach, while straightforward, is extremely resource-intensive and time-consuming. Its effectiveness heavily depends on the complexity of the encryption algorithm used (Figure 2).

Brute Force Attacks Explained

In a brute force attack, a cybercriminal uses trial and error to try and break into a device, network, or website.



Figure 2. Brute-force attacks explained

(Note – compiled by the authors on the basis of the source: <https://www.xcitium.com/brute-force-attacks/>)

The advantages of the brute-force method lie in its simplicity and universality. It can be effective when simple encryption algorithms are used, as it does not require deep knowledge of the software itself. This makes it a useful tool for the initial stage of analysis and decryption.

However, despite its simplicity and universality, the brute-force method has significant limitations. It is highly resource-intensive and can take a considerable amount of time, especially when dealing with long keys or complex encryption algorithms. This makes it impractical for real-world scenarios where quick data recovery is essential. Moreover, the brute-force method is ineffective against complex encryption algorithms used in modern ransomware (Huang J., Xu Z., Chen Y., & Tang H., 2020). In such cases, trying all possible combinations becomes virtually impossible due to the vast number of key options.

Advantages:

Direct method: Works for any encrypted data where the key is unknown, especially if the encryption algorithm is uncomplicated and the key is short.

Automation: Can be implemented through scripts and programs, making the task easier for the user.

Limitations:

High time cost: Password brute force requires significant time, especially for long keys and modern encryption algorithms (e.g., AES-256).

Computational resources: For complex keys, the method becomes inefficient and requires large computational power.

2. **Vulnerability Analysis.** Vulnerability analysis focuses on identifying weaknesses in the ransomware implementation that allow bypassing the encryption or obtaining the decryption keys (Laszka A., Farhang S., & Grossklags J., 2017). Instead of attempting to crack the encryption code directly, as in brute-force methods, vulnerability analysis looks for weaknesses in the ransomware's implementation. For example, some ransomware may use weak or predictable algorithms for key generation, making them susceptible to attacks. In other cases, the decryption key might be stored in memory or on disk in an unencrypted form, making it possible to extract.

Security experts use various techniques for vulnerability analysis, such as reverse engineering, dynamic analysis, and static analysis (Cabaj K., Kotulski Z., Mazurczyk W., & Mazurczyk W., 2018). When a vulnerability is discovered, it can be exploited to bypass the encryption or retrieve the decryption key. Vulnerability analysis can be effective against a wide range of ransomware, including those using complex encryption algorithms. Finding vulnerabilities can lead to the development of universal decryption solutions that can be used against different types of ransomware.

However, vulnerability analysis requires deep knowledge of ransomware, encryption methods, and reverse engineering skills. Finding and exploiting vulnerabilities can be a time-consuming process, especially for new or unknown ransomware variants. Additionally, vulnerabilities may be patched in new versions of ransomware, reducing this method's effectiveness.

Despite these limitations, vulnerability analysis remains one of the most effective ransomware decryption methods.

Advantages:

High efficiency: If a vulnerability is present, decryption can be performed quickly and without computational cost.

Targeted approach: This method can be effective for specific ransomware that has bugs.

Limitations:

Limited application: Vulnerabilities are not always present, and this method is only applicable to specific versions of encryption ransomware.

Difficulty of finding: Requires reverse-engineering and code analysis skills to find bugs, which can be time-consuming.

3. **Use of Expert-Created Decryptors.** Cybersecurity experts develop specialized decryption tools based on a detailed analysis of specific ransomware (Kolodenker E., Koch W., Stringhini G., & Egele M., 2017). Creating a decryptor typically involves analyzing the ransomware, developing the decryption algorithm, and building the decryption tool. Expert-created decryptors can be very effective for specific ransomware variants for which they were developed. In some cases, they can decrypt files without needing the decryption key. Many decryptors are available for free or at a low cost.

However, a decryptor created for one ransomware will not work for others. Moreover, developing a decryptor for new ransomware can take a significant amount of time, making this method less effective against new or unknown threats.

The use of expert-created decryptors is one of the most effective ways to recover files encrypted by ransomware, though its applicability is limited to specific cases.

Advantages:

Ease of use: Decryptors can be used by end users without specialised knowledge.

Spot impact: Suitable for fast data recovery if a decrypter for a given ransomware has already been created.

Limitations:

Limited use: Such decryptors are only effective for the known programmes for which they were created.

Developer-dependent: The release of a decrypter depends on how much time has passed since the discovery of the encryptor and on interest in the programme.

4. Machine Learning Methods. The application of machine learning (ML) methods to ransomware decryption relies on the ability of algorithms to identify complex patterns in data (Kharraz A., Robertson W., Balzarotti D., Bilge L., & Kirda E., 2015). ML algorithms can detect patterns and create models that can be used to decrypt new files encrypted by the same ransomware. An example of ML in ransomware decryption is neural networks (Chen J., Bridges R. A., & Ferragut E. M., 2017). Neural networks can be trained on datasets consisting of pairs of encrypted and decrypted files. Once trained, the network can be used to decrypt new encrypted files.

ML methods are promising for ransomware decryption as they can be effective against complex encryption algorithms and are capable of self-learning and adapting to new threats. However, ML methods require large amounts of data for training, which can be a challenge for new or unknown ransomware. Additionally, ML methods may be ineffective against ransomware using advanced encryption techniques, such as key randomization (Rohit K., & Gupta S., 2020).

Despite these challenges, ML methods represent a promising direction for ransomware decryption and could become more effective as ML technologies advance.

Advantages:

Efficiency: artificial intelligence can analyse and identify encryption algorithms faster than is possible manually.

Adaptability: Artificial intelligence algorithms can be adapted for new types of ransomware as they emerge.

Predictive and automatic threat detection: machine learning can identify malware before it is activated and block its actions.

Limitations:

High computing resources: machine learning and artificial intelligence require significant computing power and data to train, which can make them inefficient for small teams.

Training and tuning complexity: Requires careful tuning and training of algorithms, which requires resources and time (Conti M., Dragoni N., & Gottardo S., 2018).

Comparative Analysis of Effectiveness and Limitations.

Table 1. Comparative Analysis of Effectiveness and Limitations

Method	Effectiveness	Time Requirements	Resource Intensity	Limitations
Brute-force	Low	High	High	Ineffective against complex encryption
Vulnerability Analysis	High (if successful)	Significant	Medium	Requires expertise; vulnerabilities may be patched
Expert-Created Decryptors	High for specific cases	Medium	Low	Ineffective against new threats
Machine Learning	Promising	High (for training)	High	Requires large datasets, complex implementation
<i>Note - compiled by the authors</i>				

Each ransomware decryption method discussed has its advantages and limitations.

The choice of the optimal decryption method depends on various factors:

- Type of ransomware: Some methods are effective only against specific encryption types.
- Available resources: Time and computational limitations may rule out certain methods.
- Required data recovery speed: In critical situations, speed is a key factor.

Combining methods can increase overall effectiveness. For example, vulnerability analysis can be complemented by machine learning methods to accelerate the process (Sgandurra D., & Muñoz-González L., 2016).

The Role of Artificial Intelligence in Enhancing Decryption Methods.

Artificial Intelligence (AI) and machine learning open up new possibilities in ransomware decryption. AI can be used to automate vulnerability analysis, creating more efficient decryptors. For example, AI algorithms can be trained on datasets containing information about vulnerabilities in various ransomware. These algorithms can then automatically analyze new ransomware and identify potential weaknesses.

AI can also enhance the machine learning methods used for ransomware decryption, optimizing ML algorithms to improve their efficiency. Additionally, AI can develop new machine learning techniques specifically designed for ransomware decryption.

Ultimately, AI could help develop universal decryptors capable of working with a wide range of ransomware. This could be achieved by training AI algorithms on datasets containing information about different ransomware and their encryption methods.

Although AI is not yet widely used for ransomware decryption, it holds great potential for improving existing methods and developing new, more effective solutions. Further research in this area is crucial for combating the growing threat of ransomware.

Conclusion. Ransomware continues to evolve, becoming increasingly sophisticated. Developing effective decryption methods is a critical task in cybersecurity.

This article reviewed the main ransomware decryption methods, analyzing their advantages and limitations. It was shown that there is no universal solution; each method has its specific application and effectiveness. The authors declare that there is no conflict of interest.

Artificial intelligence and machine learning represent promising directions for future research and development. They have the potential to create more effective and adaptive methods for combating ransomware.

Conflict of interest. The author(s) declare that there is no conflict of interest.

References

- Shaukat, S., & Ribeiro, B. (2020). RansomWall: A layered defense system against crypto-ransomware attacks using machine learning. *Journal of Information Security and Applications*, 50, 102583.
- Ahmad, A., Webb, J., Desouza, K.C., & Boorman, J. (2019). Establishing a ransomware attack preparedness and response framework. *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce*, 29 (1), 1-14.
- Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. (n.d.). Ransomware guidance and resources. Retrieved from <https://www.cisa.gov/ransomware>.
- Europol. (2021). No more ransom celebrates five years of stopping ransomware. Retrieved from <https://www.europol.europa.eu/media-press/newsroom/news/no-more-ransom-celebrates-five-years-of-stopping-ransomware>.
- Mora, S., Bongiovanni, G., Giacinto, G., & Perdisci, R. (2020). Brute-force attack detection: Combining knowledge and data-driven approaches. *Computers & Security*, 92, 101739.
- Al-Rimy, B. A. S., Maarof, M.A., & Shaid, S. Z. M. (2018). Ransomware threat success factors, taxonomy, and countermeasures: A survey and research directions. *Computers & Security*, 74, 144-166.
- Azmoodeh, A., Dehghantaha, A., Choo, K. K. R., & Conti, M. (2018). Detecting crypto-ransomware in IoT networks based on energy consumption footprint. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 9(4), 1141-1152.

- Li, Y., & Guo, L. (2019). Ransomware detection using machine learning algorithms. In Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD). IEEE, 212-216.
- No More Ransom Project. (2021). Free ransomware decryption tools. Retrieved from <https://www.nomoreransom.org>.
- Asghar, M. R., Habib, S., & Javed, M. Y. (2020). Machine learning assisted approach towards ransomware detection. *IEEE Access*, 8, 114675-114685.
- Shaukat, S., & Ribeiro, B. (2018). Ransomware detection using deep learning and autoencoders. In Proceedings of the 2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), IEEE, 1-6.
- Vinayakumar, R., et al. (2019). Deep learning approach for intelligent intrusion detection system. *IEEE Access*, 7, 41525-41550.
- Sgandurra, D., & Lupu, E. C. (2016). A survey of machine learning approaches on ransomware detection. *Computers & Security*, 70, 135-151.
- Huang, J., Xu, Z., Chen, Y., & Tang, H. (2020). Enhancing ransomware detection by using convolutional neural network on general-purpose computing on graphics processing unit. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 32(16), e5666.
- Laszka, A., Farhang, S., & Grossklags, J. (2017). On the economics of ransomware. In International Conference on Decision and Game Theory for Security (pp. 397–417). Springer, Cham.
- Cabaj, K., Kotulski, Z., Mazurczyk, W., & Mazurczyk, W. (2018). Detecting ransomware using image similarity metrics. *Future Generation Computer Systems*, 90, 487–501.
- Kolodenker, E., Koch, W., Stringhini, G., & Egele, M. (2017). PayBreak: Defense against cryptographic ransomware. Proceedings of the 2017 ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security, 599–611.
- Kharraz, A., Robertson, W., Balzarotti, D., Bilge, L., & Kirda, E. (2015). Cutting the Gordian knot: A look under the hood of ransomware attacks. In International Conference on Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment (pp. 3-24). Springer, Cham.
- Chen, J., Bridges, R. A., & Ferragut, E. M. (2017). Automated behavior analysis of malware: A case study of WannaCry ransomware. Proceedings of the 2017 IEEE Symposium on Visualization for Cyber Security (VizSec), 1-8.
- Rohit, K., & Gupta, S. (2020). AI-driven anti-ransomware approaches for cyber defense. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31(7), 2263–2276.
- Conti, M., Dragoni, N., & Gottardo, S. (2018). A survey of ransomware and ransomware countermeasures. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 50(6), 1-37.
- Sgandurra, D., & Muñoz-González, L. (2016). Anti-ransomware: Measures and countermeasures for high-impact attacks. Proceedings of the 16th IEEE International Symposium on Network Computing and Applications (NCA), 53-58.

Information about authors

Zhaksybek Dias Meirbekuly – doctoral student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: zhaksibek.dias@icloud.com, +7 707 809 1053

Akhmetova Zhanar Zhumanovna – PhD, associate professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: zaigura@mail.ru*, ORCID: 0000-0002-5483-5260, + 7 778 164 9002

Popov Peter – associate professor, City University London, London, UK, E-mail: p.t.popov@city.ac.uk
Serimbetov Bulat Abutalibovich – candidate of Technical Sciences, Kazakh University of Technology and Business named after K. Kulazhanov, Astana, Kazakhstan, E-mail: sba_nmcc@mail.ru

АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
INFORMATION SYSTEMS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_147
MPHTI 71.01.85

В.Н. Зуев¹, Е.Ж. Машаев², Д.А. Спивак³, Г.К. Даумова⁴, О.А. Петрова⁵
Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,

г. Усть-Каменогорск, Казахстан

¹E-mail: VZuev@edu.ektu.kz

²E-mail: YMashayev@edu.ektu.kz

³E-mail: DSpivak@edu.ektu.kz

⁴E-mail: GDaumova@edu.ektu.kz*

⁵E-mail: OPetrova@edu.ektu.kz

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА ЛАВИННОЙ ОПАСНОСТИ В ВОСТОЧНОМ КАЗАХСТАНЕ

ШЫҒЫС ҚАЗАҚСТАНДАҒЫ КӨШКІН ҚАУПІ МОНИТОРИНГІНІҢ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ- АППАРАТТЫҚ КЕШЕНІН ӨЗІРЛЕУ

DEVELOPMENT OF A SOFTWARE-HARDWARE COMPLEX FOR AVALANCHE HAZARD MONITORING IN EAST KAZAKHSTAN

Аннотация. Для многих приложений, связанных с безопасностью, таких как картирование опасностей или управление дорогами, хорошо документированные сходы лавин имеют решающее значение. В настоящее время, несмотря на разнообразие направлений исследований в данной области, имеющиеся данные в основном ограничены изолированными местами, где они собираются наблюдателями в полевых условиях. Качественный мониторинг лавиноопасных мест позволит обеспечить безопасность людей, транспорта, туристической инфраструктуры. Разработка собственной автоматизированной системы мониторинга лавинной опасности способствует развитию систем мониторинга стихийных бедствий и окружающей среды в Республике Казахстан. В данной работе мы предлагаем наземную систему измерений, которая позволит осуществлять квазипостоянный мониторинг распределения глубины снега в зонах схода лавин с высоким пространственным и временным разрешением. Система включает в себя: базовую снеголавинную станцию (сенсоры температуры, влажности и давления, датчик ветра, логгер и приборы для автономной работы), температурную снегомерную рейку, API (application programming interface) сервис для сохранения погодных и климатических параметров в базу данных, веб интерфейс системы мониторинга лавинной опасности. Установка предназначена для автономной работы, фиксируя изменения метеоанных и глубины снега в зоне схода лавин. Она установлена в Восточно-Казахстанской области. Используя первые тестовые наборы данных, мы анализируем конкретные сильные и слабые стороны разработанной системы. Вся информация в конечном итоге будет предоставлена специалистам Восточно-Казахстанского территориального эксплуатационного управления ГУ «Казселезащита», акиматам ВКО и районов области и населению.

Ключевые слова: лавины, лавинная опасность, система мониторинга, измерительное оборудование, сенсоры, микроконтроллеры, логгер, программно-аппаратный комплекс.

Аңдатпа. Қауіптіліктерді картаға түсіру немесе жолдарды қадағлау сияқты қауіпсіздікке қатысты көптеген қосымшалар үшін көшкіндердің түсуінің дұрыс құжатталуы өте маңызды. Қазіргі уақытта осы саладағы зерттеу бағыттарының әртүрлілігіне қарамастан, қолда бар деректер негізінен бақылаушылармен далалық жағдайда жиналған оқшауланған орындармен шектеледі. Көшкін қаупі бар орындардың сапалы мониторингі адамдардың, көліктің, туристік инфрақұрылымның қауіпсіздігін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Көшкін қаупі мониторингінің меншікті автоматтандырылған жүйесін өзірлеу Қазақстан Республикасындағы табиғи апаттар мен қоршаған орта мониторингінің жүйелерін дамытуға ықпал етеді. Бұл жұмыста жоғары кеңістікті және уақыттық ажыратымдылықтағы қар көшкіні аймақтарында қар

тереңдігінің таралуына квази-тұрақты мониторинг жүргізуге мүмкіндік беретін жерүсті өлшеу жүйесін ұсынылады. Жүйеге мыналар кіреді: негізгі қар көшкіні станциясы (температура, ылғалдылық және қысым сенсорлары, жел датчигі, логгер және автономды жұмыс үшін приборлар), температуралық қар өлшегіш тақта, API (application programming interface) деректер базасына ауа-райы мен климаттық параметрлерді сақтауға арналған қызмет, көшкіні қаупінің мониторинг жүйесінің веб-интерфейсі. Қондырғы қар көшкіні аймағында метеодеректердің өзгеруін және қардың тереңдігін жаза отырып, автономды жұмыс істеуге арналған. Ол Шығыс Қазақстан облысында орнатылған. Алғашқы тестілік мәліметтер жиынтығын қолдана отырып, әзірленген жүйенің нақты күшті және әлсіз жақтары талданған. Барлық ақпарат, сайып келгенде, «Қазселденқорғау» ММ Шығыс Қазақстан аумақтық пайдалану басқармасының мамандарына, ШҚО және облыс аудандарының өкімдіктеріне және халыққа берілетін болады.

Түйін сөздер: қар көшкіні, қар көшкіні қаупі, мониторинг жүйесі, өлшеу жабдықтары, сенсорлар, микроконтроллерлер, логгер, бағдарламалық-аппараттық кешен.

Abstract. For many safety-related applications, such as hazard mapping or road management, well-documented avalanches are crucial. Currently, despite the variety of research areas in this field, the available data is mostly limited to isolated locations where they are collected by observers in the field. High-quality monitoring of avalanche-prone areas will ensure the safety of people, transport, and tourist infrastructure. The development of our own automated avalanche hazard monitoring system contributes to the development of monitoring systems for natural disasters and the environment in the Republic of Kazakhstan. In this paper we propose a ground-based measurement system that will allow for quasi-permanent monitoring of snow depth distribution in avalanche zones with high spatial and temporal resolution. The system includes: a basic snow avalanche station (temperature, humidity and pressure sensors, a wind sensor, a data logger and devices for autonomous operation), a temperature snow-measuring rail, an API (application programming interface) service for saving weather and climatic parameters to a database, and a web interface for monitoring avalanche hazards. The installation is designed for autonomous operation, recording changes in weather data and snow depth in the avalanche zone. It is installed in the East Kazakhstan region. Using the first test datasets, we analyze the specific strengths and weaknesses of the developed system. All information will eventually be provided to specialists of the East Kazakhstan Territorial Operational Management of the State Institution Kazselezashchita, akimats of East Kazakhstan region and districts of the region and the population.

Keywords: avalanches, avalanche hazard, monitoring system, measuring equipment, sensors, microcontrollers, data logger, software-hardware complex.

Введение. Так как задача прогнозирования лавинной опасности является актуальной и очень востребованной для многих стран, то на сегодняшний день данными исследованиями и разработкой автоматизированных систем занимаются почти во всем мире.

Среди разработанных систем мониторинга можно отметить созданную исследователями из Франции (Bougrova-Flin, Maldonado, Leroy, Alouani, Eckert, Bonnefoy-Demongeot, Deschatres, 2016) комплексную веб-систему мониторинга лавинной опасности. Авторы рекомендуют использовать для прогноза три набора данных: хронику лавин (Enquête Permanente sur les Avalanches, EPA), карты лавин (Carte de Localization des Phénomènes d'Avalanche, CLPA) и подборку данных об опасностях для населенных пунктов. Данные интегрированы в общую базу данных, что обеспечивает полную совместимость между всеми типами записей о снежных лавинах: оцифрованные географические данные, характеристики лавин, отчеты очевидцев, фотографии, уровни опасности и риска.

Анализ лавин на основе данных дистанционного зондирования и детальной полевой съемки предлагают авторы из Китая (Bian, Huang, Liao, Ling, Wen, Wu, 2022). Исследователи изучили центральную часть гор Шалули, провинция Сычуань, Китай. Для прогноза авторы использовали две статистические модели (функцию достоверности фактических данных (EBF) и коэффициент достоверности (CF)) в сочетании с двумя моделями машинного обучения (логистическая регрессия (LR) и многослойный перцептрон (MLP)), на основе которых были созданы четыре интегрированные модели (EBF-LR, CF-LR, EBF-MLP и CF-MLP), а также традиционная модель отношения частот (FR) для оценки лавинной восприимчивости.

Локальные особенности лавиноопасных участков лежат в основе создания методик и алгоритмов прогнозирования схода лавин, которые разрабатываются специально для региона.

К одному из известных методов прогнозирования лавин относится прогноз периода лавинной опасности. Данный период представляет собой такой промежуток времени, в течение которого фактор лавинообразования будет сохраняться на участке. Соответственно данный метод может использоваться при наличии условий лавинообразования, то есть во время снегопадов и метелей (Кочетова, 2019).

Создание лавинных прогнозов начинается с изучения лавиноопасных участков. Для них определяются лавиносорбы, измеряются и рассчитываются их морфометрические данные, собирается информация о лавинном режиме. Исходными данными являются материалы современных наблюдений за снежными лавинами, проводимые уполномоченными государственными структурами, и архивные данные. Далее рассматриваются признаки лавинной опасности, строятся статистические зависимости и математические модели. Наиболее представительным результатом обработки этих данных являются карты лавинной опасности региона.

Первые попытки разработать модель прогноза лавин были предприняты учеными (Bois, Obled, Good, 1974) на примере Швейцарии. Аналогичные исследования были проведены следующими авторами (Xi, Me, 2023), которые уточнили пространственные и временные характеристики снежного покрова: на карты они наносили сведения о снежном покрове, топографию, метеорологию и растительность.

Другой исследователь (Buser, 1989) разработал статистические модели для локального прогнозирования.

Численные одномерные модели, такие как AVAL-1D, Voellmy-Salm или VAlanghe RAdenti (VARA) (Christen, Bartelt, Gruber, 2002), широко используются в Швейцарии и других странах Европы, Америки и Азии.

Их ограничения на открытой и сложной местности привели к разработке 2D и 3D моделей, таких как SAMOS, разработанной для моделирования сухих снежных лавин (Samp, Zwinge, 2004), или RAMMS (Rapid Mass Movement Modelling), и программы для создания трехмерной модели снежной лавины с учетом рельефа и метеорологических данных (Christen, Kowalski, Bartelt, 2010). Программа разработана швейцарской компанией и основана на моделировании массопереноса с отображением траектории движения лавины. RAMMS учитывает ландшафтные и климатические данные, а также параметры конкретных событий.

Можно утверждать, что база данных о лавинах, включая геолокацию, время, тип лавины и зарегистрированные случаи схода лавин, может быть использована для автоматического картографирования с использованием дистанционного зондирования в региональном масштабе.

В западных Гималаях используются технологии дистанционного зондирования и географической информационной системы (ГИС), а также мультиспектральные, гиперспектральные и различные другие оптические и микроволновые спутниковые данные для извлечения информации о снежном покрове и местности в недоступных районах (Singh, Gusain, Mishra, Gupta, 2019).

Трехмерная модель для анализа накопления снега была разработана коллективом российских ученых (Пьянков, Шихов, Михайлюков, 2019). Она включает в себя средства хранения данных о лавиноопасных склонах, их числовых параметрах, влияющих на стабильность снежного покрова в лавиноопасных зонах. С использованием модели исследователи определили районы, для которых характерна повышенная лавинная активность, сочетая их геоморфологические данные, рассчитанные в модели, и метеорологические, полученные в процессе наблюдений.

Сбор первичных данных непосредственно в лавиноопасных зонах для создания прогнозных моделей лавинной опасности является важной задачей, от которой зависит качество прогнозов. Сбор таких данных производится на снеголавинных и метеостанциях. Например, в Швейцарии таких станций около 180 (Медеу, Благовещенский, Жданов, 2021; Предупреждения о лавинах компании «СенсАльпин»). Они автономно работают в сложных погодных условиях высокогорья. Питание каждой станции обеспечивают солнечные панели. Датчики станций от компании Campbell Scientific выполняют измерения с высоким разрешением и качеством. Управление осуществляется дистанционно (Alpine Automated Weather Instrumentation).

Для развития дистанционных систем мониторинга лавин предлагается использование различных сканеров. Так, например, система обнаружения и отслеживания лавин с применением радара AVYX компании Geograevent может в любых погодных условиях непрерывно сканировать лавиноопасный склон. При обнаружении смещения снега на склоне система автоматически подает сигнал либо на устройство, либо перекрывает дорогу посредством подключенных шлагбаумов или светофоров. Это позволяет фиксировать сход лавины в режиме реального времени и быстро распространить оповещение и ограничения. На основе полученных данных можно создавать соответствующие карты лавинных рисков. Радар также может помочь при проведении профилактических спусков лавин для оценки эффективности мероприятия (Лавинный радар компании «Geograevent»).

В качестве дистанционного метода наблюдения за лавинами могут быть использованы акустические устройства по опыту Швейцарии. Такие системы могут состоять из устройства акустического обследования, установленного на поверхности земли. Такое устройство способно не только измерить высоту снежного покрова, но и определить наличие в снежной массе слабого слоя, насыщенного водой. В сочетании с лидаром такой метод дает возможность получения сравнительно точного прогноза лавинной опасности (устройство акустического обследования склонов).

Кроме известных в мире экспериментальных площадок с использованием дистанционных методов мониторинга лавин, в России один из таких методов утвержден в руководящем документе (РД 52.37.789–2013, 2013). Согласно РД 52.37.789–2013, разработанном Федеральным государственным бюджетным учреждением «Высокогорный геофизический институт» (ФГБУ «ВГИ») Росгидромета, для дистанционного определения толщины снежного покрова в лавинных очагах может использоваться лазерный дальномер. В качестве возможного варианта в методике рассмотрено применение тахеометра Leica TS09ultra 1"Arctic, позволяющего проводить измерения толщины снега на расстояниях до 1 км.

Лазерные сканеры могут эффективно применяться для съёмки лавиноопасных участков. Такие сканеры дают наиболее точную и полную информацию о пространственном объекте – лавиноопасном склоне, создавая при сканировании облако точек с координатами (Сканер Optech ILRIS-LR). Примером использования такой технологии для мониторинга лавин может быть лазерный сканер Optech ILRIS-LR, конструкция которого позволяет сканировать лед, снег и мокрые поверхности.

Область исследования. Нами был создан прототип автономной автоматизированной мониторинговой системы лавинной опасности с возможностью раннего прогнозирования и предупреждения схода лавины. Для тестирования в реальных условиях прототип был размещен на лавиноопасном участке в Глубоковском районе Восточно-Казахстанской области, недалеко от поселка Горная Ульбинка. Наблюдение за лавинами здесь осуществляют сотрудники ГУ «Казселезащита», проходя снегомерный маршрут вдоль небольшой реки Проходная. По снегомерному маршруту в лавиносборах расположены

снегомерные рейки для измерения высоты снежного покрова. Все рейки представляют собой металлическую шпалу с черными и белыми делениями по 10 см. Рейки имеют нумерацию, наблюдения ведутся в ручном режиме. Прототип системы мониторинга размещен в лавиносборе с рейкой № 22. Схема размещения показана на рис. 1. Прямоугольник «а» представлен в укрупненном масштабе на рис. 2. Координаты размещения прототипа $49^{\circ}57'30''\text{N}$ $82^{\circ}58'32''\text{E}$.

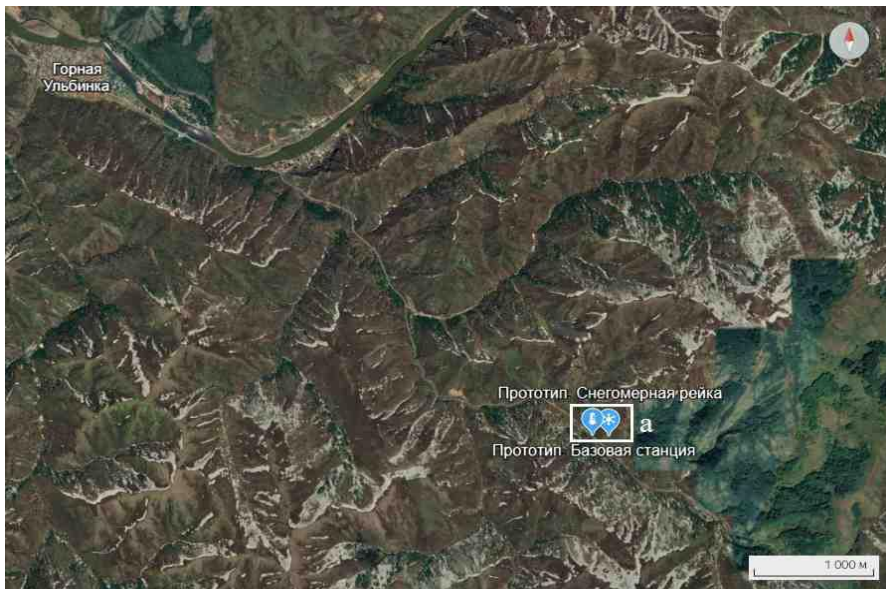


Рисунок 1. Схема размещения прототипа системы мониторинга на снегомерном маршруте реки Проходная

Примечание – составлено авторами

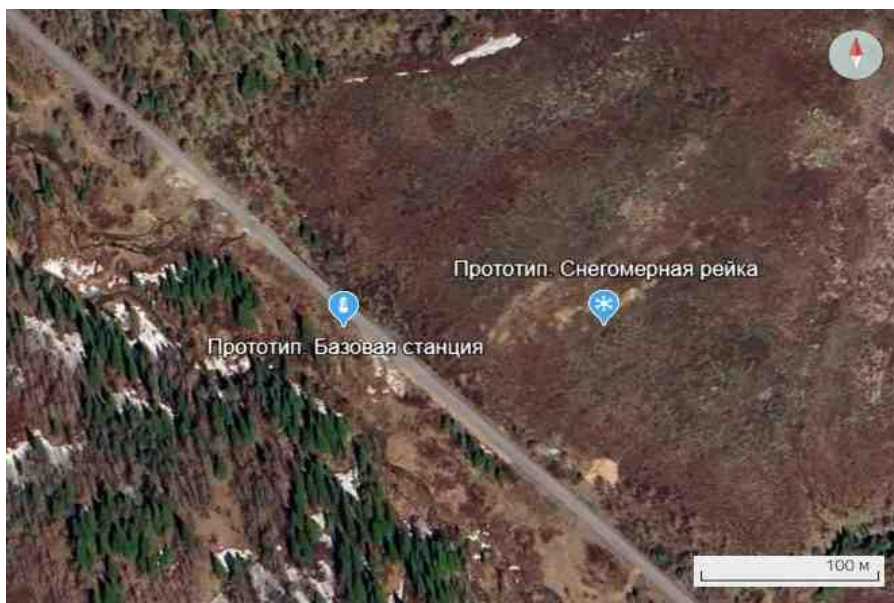


Рисунок 2. Схема размещения прототипа системы мониторинга в лавиносборе

Примечание – составлено авторами

На данном участке сход лавин определяется условиями рельефа и погоды. Высота расположения лавиносбора над уровнем моря – 560-730 м; морфологический тип – эрозионный врез; экспозиция склона – южная; крутизна склона – 26-30° (рис. 3). Морфометрия лавиносбора: длина – 200 м, ширина – 90 м, площадь – 15 500 м²; морфометрия лотка: длина – 155 м, ширина – 55 м, площадь – 5300 м². Поверхность задернована, почвенный горизонт 15-20 см, до 50 см. Осыпей не наблюдается. Растительный покров: кустарник, разнотравье. Объекты в зоне воздействия: автодорога (рис. 4).

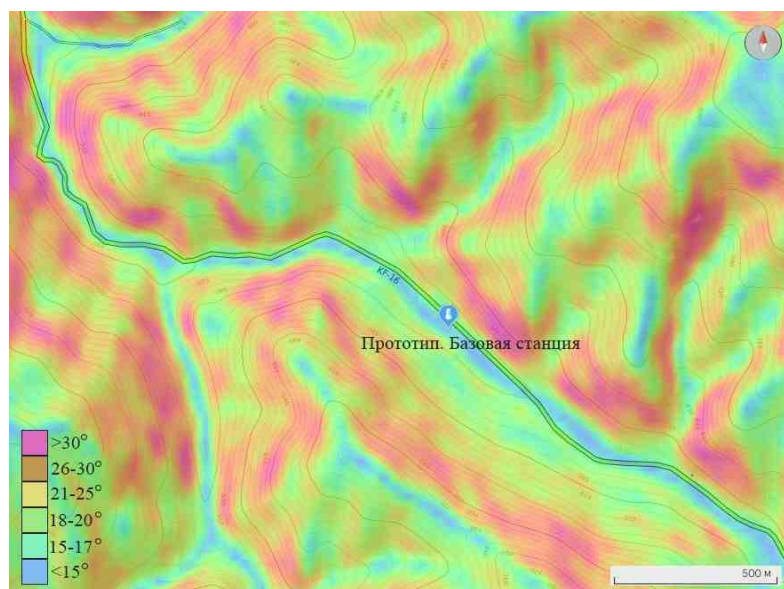


Рисунок 3. Уклоны местности в месте размещения прототипа

Примечание – составлено авторами

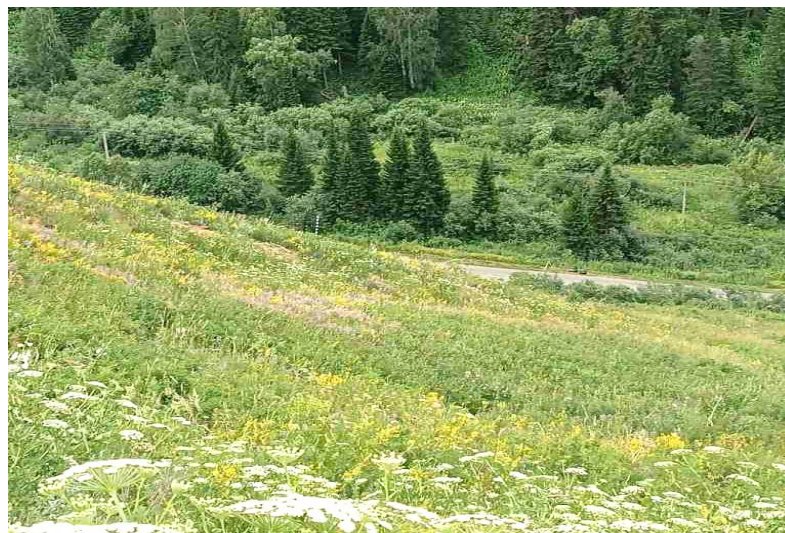


Рисунок 4. Растительный покров лавиносбора

Примечание – составлено авторами

Особенности рельефа и микроклимата данной территории способствуют ветровому переносу снега с наветренной стороны склона в эрозионный врез, где происходит его

накопление (рис. 5). В результате большой массы снега в лотке и формирования неустойчивых состояний снежного покрова при потеплении и ветре возможен самопроизвольный сход лавины.



Рисунок 5. Лоток лавиносбора осенью и накопление снега в лотке зимой

Примечание – составлено авторами

Методы исследования. Основными составляющими системы мониторинга лавин, создаваемой в рамках данного проекта, являются (рис. 6):

- снеголавинная станция;
- температурная снегомерная рейка;
- API (application programming interface) сервис для сохранения погодных и климатических параметров в базу данных;
- веб-интерфейс системы мониторинга лавинной опасности.

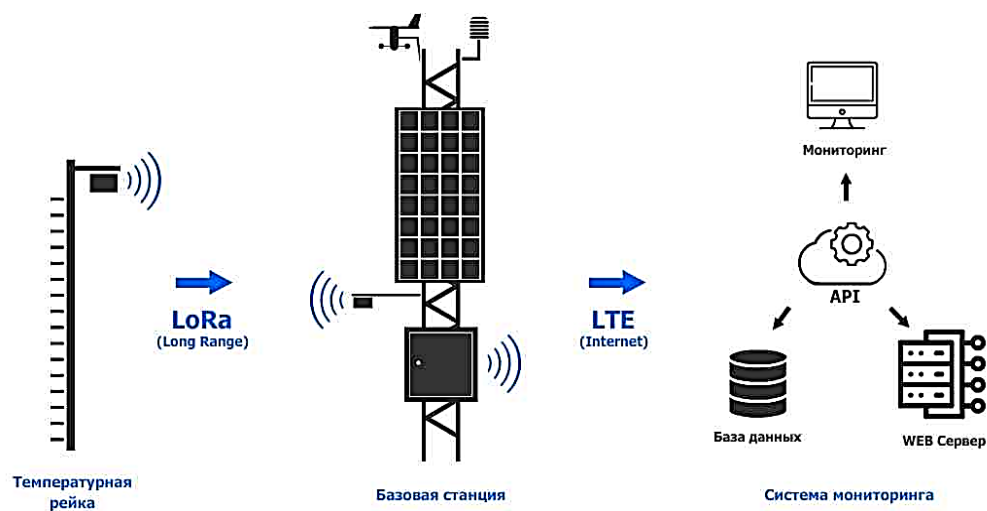


Рисунок 6. Схема системы мониторинга лавинной опасности

Примечание – составлено авторами

Снеголавинная базовая станция представляет собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из датчиков и оборудования, осуществляющих сбор информации о ключевых погодных и климатических параметрах для обеспечения эффективного мониторинга и передачи данных в реальном времени. Перечень оборудования, установленного на прототипе снеголавинной станции, представлен в табл. 1. В перечень получаемых погодных и климатических параметров входят:

- скорость ветра;
- направление ветра;
- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- атмосферное давление;
- высота снежного покрова;
- температурный градиент снежного покрова.

Таблица 1. Оборудование станции

№	Наименование	Описание
1	Data Logger Ser[LOG] Plus	Предназначен для записи, хранения и анализа данных, поступающих от различных сенсоров, датчиков или внешних источников. Энергопотребление: 10-30 В постоянного тока. Интерфейс: 5 x RS 485; 6 x RS 422; 4 x RS 232; USB-Device; USB-Host; Ethernet. Поддерживаемые протоколы: SDI-12, Modbus RTU, Modbus TCP, NMEA. Есть поддержка отправки данных по протоколу HTTPS и MQTT.
2	Датчик ветра ДВМ-6410	Предназначен для измерения скорости воздушного потока и направления ветра для автономной работы или в составе метеорологических станций и комплексов. Поддерживаемые протоколы: Modbus-RTU, NMEA-0183.
4	Сенсор температуры, влажности и давления ТНР[pro] - Temperature-Humidity-Pressure Sensor	Многофункциональное устройство, предназначенное для измерения температуры, влажности и атмосферного давления. Используется в различных приложениях, включая мониторинг окружающей среды, системы контроля климата, умные здания, метеорологические станции и другие области, где требуется точное измерение этих параметров. Поддерживаемые протоколы: SDI-12, NMEA, Modbus.
5	Солнечная панель OSDA Solar 380M ODA380-30-MH (Half-Cell)	Монокристаллическая солнечная панель. Класс качества – Grade A, Максимальная мощность (P _{тах}) – 380 Вт. Диапазон рабочей температуры, °С – от -40 до +85. Рама – анодированный алюминий. Размер – 1755x1038 мм.
6	Аккумулятор (2 шт) VEKTOR GPL 12-75	Тип AGM, емкость АКБ (С20) - 75 Ач, номинальное напряжение АБ – 12 В, внутреннее сопротивление – 6 мОм, саморазряд – 3 %, тип клемм – под болт М6 (Т6, Т7, Т13, В4, В5), максимальный ток заряда – 22,5 А, максимальный ток разряда – 750 А, диапазон температуры разряда, °С – от -20 до +60.
7	Контроллер заряда для солнечных панелей SRNE SR-ML2420 MPPT	MPPT контроллер заряда солнечных батарей на 20 А, разработан для фотоэлектрических систем на 12/24 В. Максимальная мощность солнечных панелей – 260/520 Вт. Контроллер оптимизирует процесс заряда, не допуская перезаряда аккумуляторов.
8	Автоматические выключатели (2 шт) ВА 47-29	Предназначены для защиты распределительных и групповых цепей, имеющих различную нагрузку.
9	Реле времени 12-240В AC/DC IEK	Предназначено для автоматического включения электротехнического оборудования с задержкой после подачи команды на включение.

Окончание табл. 1

№	Наименование	Описание
10	Роутер LTE/Wi-Fi-роутер iRZ RL25w	Предназначен для передачи данных с использованием сети сотовой связи. 4 LAN-порта, LTE 4G режим, 2 SIM-карты, интерфейсы RS-232 и RS-485, 15 выводов GPIO и встроенный Wi-Fi.
11	Шкаф уличный всепогодный 12U	Предназначен для размещения автономно функционирующего активного и пассивного оборудования, поддержания заданного температурного режима внутри шкафа при эксплуатации
12	DC-DC преобразователь	Предназначен для обеспечения стабильного питания микроконтроллера Heltec LoRa 32, интегрированного в систему мониторинга, используется для понижения напряжения с 12 В, подаваемых от аккумуляторной батареи, до 5 В.
13	Антенно-мачтовое сооружение СТ-А3Т	Ферменная мачта из набора алюминиевых секций длиной 3 метра с треугольным сечением. Служит для использования навесного оборудования увеличенной массы, выдерживает экстремальные погодные условия, такие как сильные ветра, снеговые нагрузки и температурные колебания, что крайне важно в горных условиях.
14	Лазерный дальномер HI50	Предназначен для быстрого определения расстояния с миллиметровой точностью. С его помощью осуществляется измерение высоты снежного покрова.
15	Модуль беспроводной связи Heltec LoRa 32	Используется для передачи данных в нелицензируемом диапазоне частот.
16	Молниезащита	Состоит из антенны, камеры, молниеприёмника, заземления. Предназначена для защиты мачты и навесного оборудования от удара молнии.

Примечание – составлено авторами

Источником данных о скорости и направлении ветра является датчик ветра ДВМ-6410. Для измерения температуры, влажности и атмосферного давления используется сенсор TNP[pro] Temperature-Humidity-Pressure Sensor в защитном кожухе Sensor shelter (Рис. 7).



Рисунок 7. Размещение датчиков и сенсоров на базовой станции

Примечание – составлено авторами

Показания датчиков передаются на регистратор данных Ser[LOG] Plus по протоколу Modbus. Данный логгер поддерживает подключение и работу с множеством различных

датчиков: от датчиков температуры и влажности до более сложных метеорологических сенсоров, таких как барометры, анемометры и другие устройства. Устройством поддерживаются различные методы подключения, включая интерфейсы RS-232, RS-485, USB и аналоговые входы. Регистратор может собирать данные в реальном времени, а также поддерживать режимы периодического или событийного сбора данных. Он может хранить данные в своей памяти или передавать их на внешний сервер.

Ниже представлен код, исполняемый на LTE/Wi-Fi-роутере, реализующий функциональность прокси-сервера, который принимает HTTP-запросы на локальном хосте, изменяет параметры заголовков запроса и пересылает его на удалённый API-сервер с использованием SSL-соединения.

```
import socket
import ssl
from struct import pack, unpack, unpack_from

def send_via_ssl_socket(packet : bytes):

    HOST, PORT = "ApiHost", 0001
    sock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
    sock.settimeout(10)
    sock.connect((HOST, PORT))
    sock.send(packet.encode("utf-8"))
    sock.close()

ssock = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
ssock.bind(("0.0.0.0", 5000))
ssock.listen()
try:
    while True:
        con, addr = ssock.accept()
        packet = con.recv(1024).decode().replace("Host: 192.168.1.11:5000", "Host:
ApiHost:0001")
        con.send(
            """HTTP/1.1 200 OK
Server: Werkzeug/3.0.1 Python/3.10.12
Date: Wed, 04 Dec 2024 07:00:46 GMT
Content-Type: text/html; charset=utf-8
Content-Length: 4
Connection: close

true"""
            .encode("utf-8")
        )
        send_via_ssl_socket(packet)
except KeyboardInterrupt:
    ssock.close()
```

Все агрегированные регистратором показания датчиков преобразуются в удобный для передачи JSON формат и с периодичностью 15 минут отправляются по протоколу HTTP на API-сервис “AvaAPI”, разработанный в рамках текущего проекта (Зуев, Федькин,

Спивак, Машаев, Денисова, Петрова, Четтыкбаев, 2024). Сервер "AvaAPI" принимает запрос, проводит авторизацию, валидирует переданные данные и сохраняет их в базу для дальнейшего анализа (рис. 6). Процесс передачи данных между логгером и API-сервисом обеспечивается по LTE интернет-соединению через роутер iRZ RL25w.

Автономность системы обеспечивается использованием солнечной панели OSDA Solar 380M ODA380-30-MH с пиковой мощностью 380 Вт, работающей в связке с двумя аккумуляторными батареями емкостью 75 А·ч каждая. Управление зарядом аккумуляторов осуществляется через контроллер SRNE SR-ML2420 MPPT, который оптимизирует производительность солнечной панели.

Основное оборудование, за исключением датчиков, размещено во всепогодном уличном шкафу 12U (рис. 8), который защищает аппаратуру от неблагоприятных погодных условий и поддерживает заданный температурный режим. Сам шкаф с оборудованием и датчики смонтированы на ферменной мачтовой конструкции высотой шесть метров.

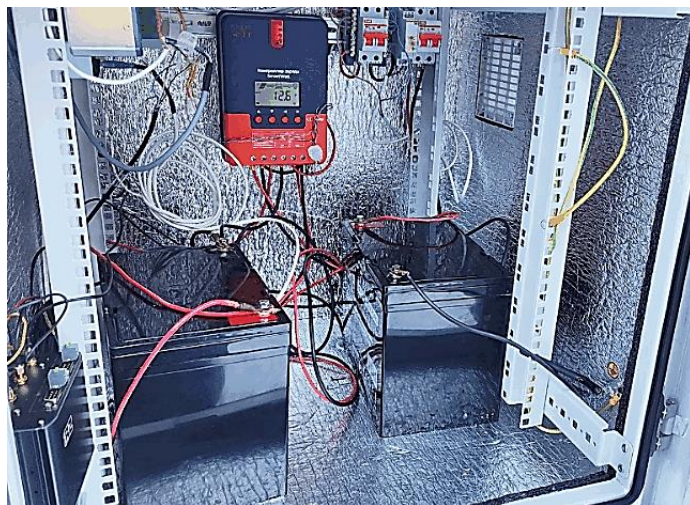


Рисунок 8. Оборудование уличного всепогодного шкафа

Примечание – составлено авторами

Кроме погодных и климатических параметров важным для мониторинга и прогнозирования лавинной опасности является информация о снежном покрове. Сбор этих параметров обеспечивается температурными снегомерными рейками (рис. 9) и микроконтроллером Heltec LoRa 32 в паре с лазерным дальномером, установленным непосредственно на базовой станции, который является приемником данных со снегомерных реек. Дальность передачи данных LoRa-сигналом зависит от ряда факторов, включая частоту, местность, условия окружающей среды и мощность сигнала. В условиях хорошей видимости и при использовании оптимальной антенны, устройство может передавать данные до 30 км (в условиях прямой видимости).

Температурные снегомерные рейки являются автономными устройствами, интегрированными в систему мониторинга. Каждая рейка базируется на микроконтроллере CubeCell – AV01 Dev-Board (V2) и оснащена рядом ключевых компонентов (рис. 10, табл. 2) для сбора и передачи данных.

Температурная снегомерная рейка включает в себя: лазерный дальномер HI50, предназначенный для высокоточного измерения высоты снежного покрова; 18 температурных датчиков DS18B20, установленных на вертикальной рейке с шагом 10 см, что позволяет получать подробные данные о температурных слоях снежного покрова; два

литий-полимерных аккумулятора емкостью 10000 мАч, обеспечивающих энергоавтономность устройства; две солнечные панели размером 60×60 мм с выходным током 80 мА, которые поддерживают заряд аккумуляторов и продлевают срок работы устройства в автономном режиме.



Рисунок 9. Температурная снегомерная рейка, установленная на склоне

Примечание – составлено авторами

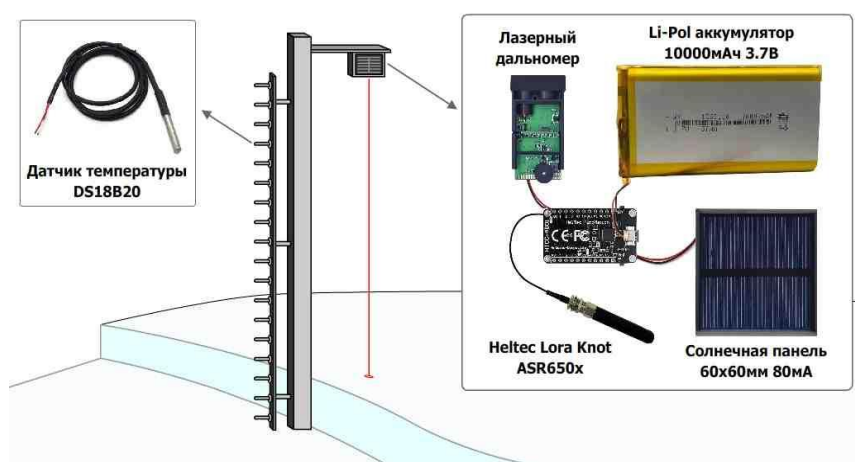


Рисунок 10. Оборудование температурной снегомерной рейки

Примечание – составлено авторами

Температурные снегомерные рейки осуществляют сбор данных о высоте снега, температурном градиенте снежного покрова и напряжении на аккумуляторе. Собранные данные передаются каждые 15 минут с использованием протокола беспроводной связи LoRa (Long Range) на частоте 433 МГц на приемник, расположенный на базовой снеговалинной станции (рис. 11).

Таблица 2. Оборудование на снегомерной рейке

№	Наименование	Описание
1	Микроконтроллер CubeCell – AB01 Dev-Board (V2)	Микроконтроллер с интегрированным модулем LoRa для беспроводной передачи данных. Модуль LoRa (Long Range) используется для связи на больших расстояниях при низком потреблении энергии для применения в удалённых областях с плохим покрытием сотовых сетей.
2	Солнечные панели (2 шт)	Панели размером 60х60мм, 80мА, 5.5В 0.44Вт. Они обеспечивают зарядку встроенной батареи, что позволяет работать устройству в автономном режиме.
3	Литий-полимерный аккумулятор (2шт)	Аккумулятор на 10000 мАч, 3.7 В - источник питания для портативных устройств, имеет высокую ёмкость и компактность.
4	Лазерный дальномер HI50	Предназначен для определения расстояний с использованием лазерной технологии. Диапазон измерения расстояний от 0,02 до 50 м, питание 3 В. Имеет высокую точность измерений ± 1.5 мм.
5	Датчик температуры водонепроницаемый DS18B20 с кабелем (18шт)	Датчик представляет собой цифровой термометр, использующий технологию 1-Wire, что означает, что для передачи данных используется один провод. Это упрощает подключение и позволяет подключать несколько датчиков к одному порту. Датчик производит точные измерения температуры, преобразуя её в цифровой сигнал, который легко считывается с помощью микроконтроллеров, таких как Arduino, Raspberry Pi или других устройств.

Примечание – составлено авторами

**Рисунок 11.** Приемник данных с температурной снегомерной рейки

Примечание – составлено авторами

Данные температурной снегомерной рейки визуализируются в многоцветный температурный график (рис. 12).

Роль приемника на базовой станции выполняет микроконтроллер Heltec LoRa 32, который также оснащен лазерным дальномером HI50 (табл. 3). Это позволяет устройству совмещать функции измерения высоты снежного покрова и приема данных от температурных реек. Микроконтроллер агрегирует данные в своей памяти и с интервалом в 15 минут передает их на API-сервис "AvaAPI". Передача данных осуществляется через Wi-Fi-соединение между Heltec LoRa 32 и LTE/Wi-Fi-роутером iRZ RL25w, который обеспечивает подключение к сети интернет.

Прототип системы мониторинга лавинной опасности состоит из базовой станции – мачты с навесным оборудованием и температурной снегомерной рейки (рис. 13).

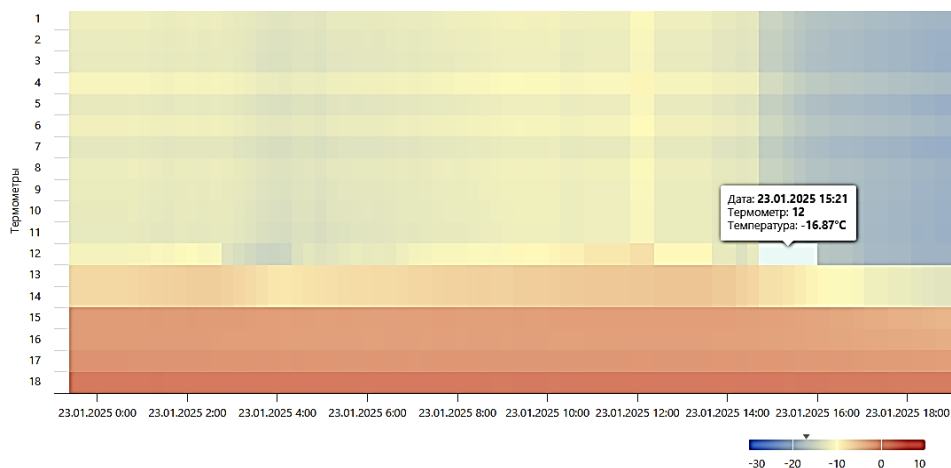


Рисунок 12. Визуализация данных с температурной снегомерной рейки

Примечание – составлено авторами

Таблица 3. Оборудование на приемнике данных с температурной снегомерной рейки

№	Наименование	Описание
1	Модуль беспроводной связи Heltex LoRa 32	Компактное и энергоэффективное устройство, предназначенное для применения в IoT (Интернет вещей) приложениях. Оснащено технологией LoRa для беспроводной передачи данных на большие расстояния при низком энергопотреблении. Поддерживает различные интерфейсы для подключения внешних устройств (например, I2C, UART, SPI и другие), что расширяет возможности для интеграции с различными сенсорами и модулями. Плата поддерживает подключение к сетям Wi-Fi с диапазоном частот 2.4 GHz, что позволяет использовать её в сетях с передачей данных на большие расстояния и обмениваться данными через интернет. Имеет интегрированный OLED-дисплей для удобного отображения данных.
2	Лазерный дальномер HI50	Компактное и точное измерительное устройство, предназначенное для определения расстояний с использованием лазерной технологии. Имеет высокую точность измерений ± 1.5 мм.

Примечание – составлено авторами

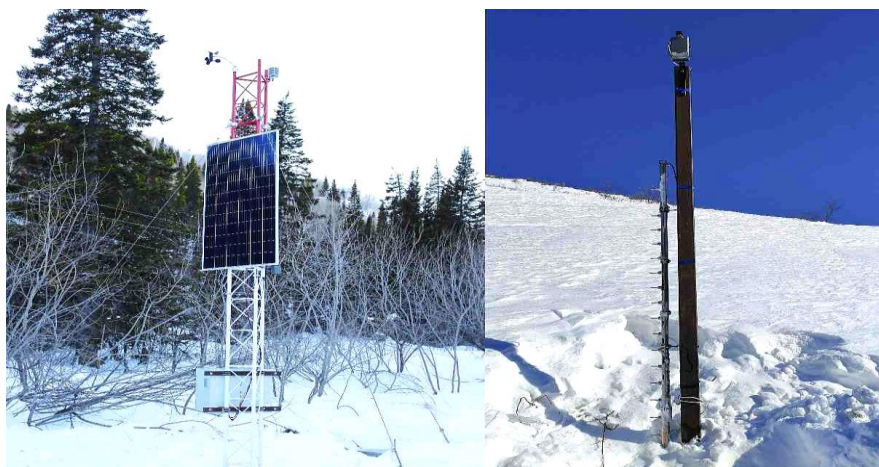


Рисунок 13. Прототип системы мониторинга лавинной опасности

Примечание – составлено авторами

На лавиноопасном участке может быть уставлено несколько снегомерных реек. Базовая станция может быть установлена в границах лавиноопасного участка недалеко от лавиносбора. Это обеспечит сбор актуальных для участка метеоданных и сохранность базовой станции от лавины. Температурные снегомерные рейки, напротив, могут быть установлены в местах, где необходим контроль высоты снега, например непосредственно в лавиносборе или в зоне активного ветрового переноса снега.

Заключение. Таким образом, для мониторинга лавинной опасности целесообразно использовать автономные программно-аппаратные комплексы, которые обеспечивают сбор метеоданных, сведения о снежном покрове и передачу данных или связь с серверной инфраструктурой, на базе которой можно выполнять аналитическую обработку полученных данных и прогнозировать вероятный сход лавин.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Данное исследование проводилось в рамках научно-технической программы ПЦФ BR21882022 «Исследование лавинной активности в Восточно-Казахстанской области для разработки систем мониторинга и научного обоснования их размещения» на 2023-2025 годы.

«Уведомление об использовании генеративного ИИ и технологиях с его помощью в процессе написания рукописи». При подготовке данной работы авторы не использовали генеративный ИИ.

Список литературы

- Bourova-Flin E., Maldonado E., Leroy J.-B., Alouani R., Eckert N. Bonnefoy-Demongeot M., Deschatres M. A new web-based system to improve the monitoring of snow avalanche hazard in France, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16, 1205-1216, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-1205-2016>.
- Bian R, Huang K, Liao X, Ling S, Wen H, Wu X. Snow avalanche susceptibility assessment based on ensemble machine learning model in the central Shaluli Mountain Front, *Earth Sci.*, 2022, 10:880711, <https://doi.org/10.3389/feart.2022.880711>.
- Кочетова Т.В. Методы прогноза лавинной опасности на примере прилегающих районов Эльбруса // Форум молодых ученых, 2019, 6 (34). – С. 632-639. // Kochetova T.V. Metody prognoza lavinnoj opasnosti na primere prilgayushchih rajonov El'brusa // Forum molodyh uchenyh, 2019, 6 (34). – С. 632-639.
- Bois P., Obled C., Good W. Multivariate data analysis as a tool for day-by-day avalanche forecast. *International Association of Hydrological Sciences Publication 114 (International symposium on snow mechanics)*, Grindelwald, Switzerland, 1974, 391-403.
- Xi N., Me G. Avalanche susceptibility mapping by investigating spatiotemporal characteristics of snow cover based on remote sensing imagery along the Pemo Highway—a critical transportation road in Tibet, China, *Water*, 2023, 15(15), 2743, <https://doi.org/10.3390/w15152743>.
- Buser O. Two Years Experience of Operational Avalanche Forecasting using the Nearest Neighbours Method. *Ann. Glaciol.* 1989, 13, 31–34, <https://doi.org/10.3189/S026030550000759X>.
- Christen M., Bartelt P., Gruber U. AVAL-1D: An avalanche dynamics program for the practice. *Conference proceedings "Protection of habitat against floods, debris flows and avalanches" (1st congress "Interpraevent in the Pacific Rim")*, Matsumoto, Japan, 2002, 715–725.
- Sampl P., Zwinger T. Avalanche simulation with SAMOS, *Ann. Glaciol.*, 2004, 38, 393–398, <https://doi.org/10.3189/172756404781814780>.
- Christen M., Kowalski J., Bartelt P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2010, 63, 1–14, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005>.
- Singh D.K., Gusain H.S., Mishra V.D., Gupta N. *Avalanche Hazard Mitigation in Western & Central Himalaya-II*, Defence Research and Development Organisation, 2019
- Пьянков С.В., Шихов А.Н., Михайлюков П.Г. Моделирование снегонакопления и снеготаяния в бассейне р. Кама с применением данных глобальных моделей прогноза погоды, Лёд и Снег. 2019, 59(4). - 494-508, <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-423>. // P'yankov S.V., SHihov A.N., Mihajlyukov P.G. Modelirovanie snegonakopleniya i snegotayaniya v bassejne r. Kama s primeneniem

- dannyh global'nyh modelej prognoza pogody, Lyod i Sneg. 2019, 59(4). - 494-508, <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-4-423>.
- Медеу А.Р., Благовещенский В.П., Жданов В.В. Инновационные технологии оценки и прогноза уровня лавинной опасности в горах Иле Алатау, Хабаршы. География сериясы, 2021, №2 (61). - С.76-87 <https://doi.org/10.26577/JGEM.2021.v61.i2.07>. // Medeu A.R., Blagoveshchenskij V.P., Zhdanov V.V. Innovacionnye tekhnologii ocenki i prognoza urovnya lavinnoj opasnosti v gorah Ile Alatau, Habarshy. Geografiya seriyasy, 2021, №2 (61). - S.76-87 <https://doi.org/10.26577/JGEM.2021.v61.i2.07>.
- Предупреждения о лавинах компании «СенсАльпин», Lawinenwarnung-Schneemeteorologie // [Электронный ресурс] URL: <https://www.sensalpin.ch/messnetze/imis/> (дата обращения 31.01.2025) // Preduprezhdeniya o lavinah kompanii «SensAl'pin», Lawinenwarnung-Schneemeteorologie // [Elektronnyj resurs] URL: <https://www.sensalpin.ch/messnetze/imis/> (data obrashcheniya 31.01.2025).
- Alpine Automated Weather Instrumentation // [Electronic resource] URL: <https://www.campbellsci.co.uk/alpine-weather> (date of request 31.01.2025).
- Лавинный радар компании «Геопраевент»// [Электронный ресурс] URL: <https://www.geopraevent.ch/technologies/avalanche-radar/?lang=en> (дата обращения 31.01.2025). // Lavinnij radar kompanii «Geopraevent»// [Elektronnyj resurs] URL: <https://www.geopraevent.ch/technologies/avalanche-radar/?lang=en> (data obrashcheniya 31.01.2025).
- Устройство акустического обследования склонов// [Электронный ресурс] URL: <https://www.ski.ru/az/blogs/post/novyi-variant-prognozirovaniya-lavinnoi-opasnosti/> (дата обращения 31.01.2025). // Ustrojstvo akusticheskogo obsledovaniya sklonov // [Elektronnyj resurs] URL: <https://www.ski.ru/az/blogs/post/novyi-variant-prognozirovaniya-lavinnoi-opasnosti/> (data obrashcheniya 31.01.2025).
- РД 52.37.789–2013 Методика дистанционного определения толщины снежного покрова в лавинных очагах с использованием лазерного дальномера. Нальчик ООО «Полиграфсервис и Т», 2013. – 31 с. // RD 52.37.789–2013 Metodika distancionnogo opredeleniya tolshchiny snezhnogo pokrova v lavinnnyh ochagah s ispol'zovaniem lazernogo dal'nomera. Nal'chik ООО «Poligrafservis i T», 2013 – 31 s.
- Сканер Optech ILRIS-LR// [Электронный ресурс] URL: <https://www.jena.ru/catalog/19/45.html> (дата обращения 31.01.2025) // Skaner Optech ILRIS-LR // [Elektronnyj resurs] URL: <https://www.jena.ru/catalog/19/45.html> (data obrashcheniya 31.01.2025).
- Зуев В.Н., Федькин Е.М., Спивак Д.А., Машаев Е.Ж., Денисова Н.Ф., Петрова О.А., Четтыкбаев Р.К. Программа для ЭВМ AvaLog API. Авторское свидетельство № 48238, от «9» июля 2024 года // Zuev V.N., Fed'kin E.M., Spivak D.A., Mashaev E.ZH., Denisova N.F., Petrova O.A., CHettykbaev R.K. Programma dlya EVM AvaLog API. Avtorskoe svidetel'stvo № 48238, ot «9» iyulya 2024 goda

Information about authors

Zuev Vitaly Nikolaevich – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19 Serikbayeva St., Ust-Kamenogorsk, 070010, Head of the Department of Support and Information Technologies at D. Serikbayev EKTU, tel. 87014911657, e-mail: VZuev@edu.ektu.kz

Mashayev Yerbolat Zhomartovich – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19 Serikbayeva St., Ust-Kamenogorsk, 070010, engineer of the second category of the highest qualification level of the Department of Support and Information Technology of the Department of Information Technology, tel. 87771789819, e-mail: YMashayev@edu.ektu.kz

Spivak Dmitriy Alexeevich – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19 Serikbayeva St., Ust-Kamenogorsk, 070010, Engineer of the Department of Support and Information Technology of the Department of Information Technology, tel. 87476109254, e-mail: DSpivak@edu.ektu.kz

Daumova Gulzhan Kamalbekyzy – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 070010, Ust-Kamenogorsk, Serikbayev st 19, Professor of the School of Earth, tel. 8-777-396-12-47, e-mail: GDaumova@edu.ektu.kz*

Petrova Olga Anatolievna – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19 Serikbayeva St., Ust-Kamenogorsk, 070010, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the School of Geosciences, tel. 87778490016, e-mail: OPetrova@edu.ektu.kz

АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
AUTOMATION AND CONTROL

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_163
MFTAA 50.43.15

Б.Т. Иманбек¹, Ж.Е. Байғараева², Н.Н. Қурманова³, А.К. Болтабоева⁴, Ж.Б. Кальпеева⁵

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

E-mail: imanbek.baglan18.06@gmail.com*

E-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com

E-mail: nuraida.kurmanovaa@gmail.com

E-mail: asiya322m@gmail.com

²Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,

Алматы қ., Қазақстан

E-mail: z.kalpeyeva@satbayev.university

AI ЖӘНЕ SCADA КӨМЕГІМЕН МЕДИЦИНАДАҒЫ СТЕРИЛЬДІ ЖАҒДАЙЛАРДЫ БАҚЫЛАУ МЕН БАСҚАРУДЫҢ ИННОВАЦИЯЛЫҚ ТӘСІЛДЕРІ

ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К МОНИТОРИНГУ И УПРАВЛЕНИЮ СТЕРИЛЬНЫМИ УСЛОВИЯМИ В МЕДИЦИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИИ И SCADA

INNOVATIVE APPROACHES TO MONITORING AND MANAGEMENT OF STERILE CONDITIONS IN MEDICINE USING AI AND SCADA

Аңдатпа. Медициналық мекемелердегі таза үй-жайларды басқару үшін жасанды интеллектті SCADA жүйелеріне біріктіру өте маңызды міндет болып табылады, өйткені бұл үй-жайлардың стерильділігі медициналық процедуралардың қауіпсіздігіне және инфекциялық асқынулардың қаупін азайтуға тікелей әсер етеді. Бұл зерттеу қазіргі заманғы денсаулық сақтау мекемелері үшін өте маңызды болып табылатын бақылау және басқару жүйелерінің дәлдігі мен сенімділігін арттырудағы жасанды интеллекттің өлеуетін бағалауға бағытталған. Бұл мақаланың мақсаты-жасанды интеллекттің SCADA жүйелері арқылы таза бөлмелердегі микроклимат параметрлерін басқаруды жақсарту мүмкіндіктерін көрсету, бұл қазіргі жағдайды дәл бақылауға ғана емес, сонымен қатар белгіленген нормалардан ықтимал ауытқуларды болжауға мүмкіндік береді. Зерттеу әдістемесі SCADA жүйелерінен жиналған деректердің сандық талдауын және жасанды интеллекттің дамыған моделінің жұмысын сапалы талдауды қамтиды. Нейрондық желілік модельдерді әзірлеу және оқыту бірнеше медициналық мекемелердің нақты операциялық деректері негізінде жүргізілді. Зерттеу нәтижесінде AI-ны SCADA жүйелеріне біріктіру микроклиматтық жағдайлардың өзгеруіне болжау дәлдігі мен жауап берудің жеделдігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік беретіні анықталды, бұл қажетті стерильділік деңгейін сақтауға ықпал етеді. Авторлар ықтимал бұзушылықтардың алдын алуда жоғары тиімділікті көрсететін алгоритмдерді әзірледі және сынап көрді. Нәтижелер айтарлықтай теориялық және практикалық маңыздылыққа ие, өйткені олар таза бөлмелердегі ішкі микроклиматты басқару процестерін түсінуді жақсартуға ғана емес, сонымен қатар оларды оңтайландырудың тиімді құралдарын ұсынады. Бұл медициналық мекемелердің жалпы тиімділігін арттыруға және көрсетілетін медициналық қызметтердің сапасын жақсартуға ықпал етеді.

Түйін сөздер: жасанды интеллект, SCADA жүйелері, таза үй-жайларды басқару, медициналық мекемелер, микроклиматты бақылау, санитария, генетикалық ресурстар, ауа сапасы, негізгі медициналық көмекке қол жеткізудегі кедергілер.

Аннотация. Интеграция искусственного интеллекта в системы SCADA для управления чистыми помещениями в медицинских учреждениях является высокоактуальной задачей, поскольку стерильность этих помещений напрямую влияет на безопасность медицинских процедур и снижение риска инфекционных осложнений. Это исследование направлено на оценку потенциала искусственного интеллекта в повышении точности и надежности систем мониторинга и управления, что критически важно для современных медицинских учреждений. Цель данной статьи заключается в демонстрации возможностей искусственного интеллекта

улучшить управление параметрами микроклимата в чистых помещениях через системы SCADA, что позволяет не только точно мониторить текущее состояние, но и прогнозировать потенциальные отклонения от установленных норм. Методология исследования включает использование количественного анализа данных, собранных с систем SCADA, и качественного анализа работы разработанной модели искусственного интеллекта. Разработка и обучение нейросетевых моделей проводилась на основе реальных операционных данных из нескольких медицинских учреждений. В результате исследования было выявлено, что интеграция ИИ в системы SCADA позволяет значительно повысить точность прогнозирования и оперативность реагирования на изменения микроклиматических условий, что способствует поддержанию необходимого уровня стерильности. Авторами разработаны и апробированы алгоритмы, которые демонстрируют высокую эффективность в предотвращении возможных нарушений. Полученные результаты имеют значительную теоретическую и практическую значимость, поскольку они позволяют не только улучшить понимание процессов управления внутренним микроклиматом в чистых помещениях, но и предлагают эффективные инструменты для их оптимизации. Это способствует повышению общей эффективности медицинских учреждений и улучшению качества оказываемых медицинских услуг.

Ключевые слова: искусственный интеллект, системы SCADA, управление чистыми помещениями, медицинские учреждения, мониторинг микроклимата, санитария, генетические ресурсы, качество воздуха, барьеры к доступу к базовому здравоохранению.

Abstract. The integration of artificial intelligence into SCADA systems for the management of clean rooms in medical institutions is a highly relevant task, since the sterility of these rooms directly affects the safety of medical procedures and reduces the risk of infectious complications. This study aims to assess the potential of artificial intelligence in improving the accuracy and reliability of monitoring and control systems, which is critically important for modern medical institutions. The purpose of this article is to demonstrate the capabilities of artificial intelligence to improve the management of microclimate parameters in clean rooms through SCADA systems, which allows not only to accurately monitor the current state, but also to predict potential deviations from established norms. The research methodology includes the use of quantitative analysis of data collected from SCADA systems and qualitative analysis of the work of the developed artificial intelligence model. The development and training of neural network models was carried out on the basis of real operational data from several medical institutions. As a result of the study, it was revealed that the integration of AI into SCADA systems can significantly improve the accuracy of forecasting and responsiveness to changes in microclimatic conditions, which contributes to maintaining the necessary level of sterility. The authors have developed and tested algorithms that demonstrate high efficiency in preventing possible violations. The results obtained have significant theoretical and practical significance, since they allow not only to improve the understanding of the processes of managing the internal microclimate in clean rooms, but also offer effective tools for their optimization. This contributes to improving the overall efficiency of medical institutions and improving the quality of medical services provided.

Keywords: artificial intelligence, SCADA systems, clean room management, medical facilities, microclimate monitoring, sanitation, genetic resource, air quality, barrier to basic health access.

Қысқашы. Таза бөлмелер денсаулық сақтау мекемелерінде, әсіресе операциялық бөлмелерде, зертханаларда және қоршаған ортаның стерильділігі инфекциялардың алдын алудың және медициналық процедуралардың тиімділігін қамтамасыз етудің негізгі факторы болып табылатын басқа аймақтарда маңызды рөл атқарады. Мұндай бөлмелерді басқару ауа тазалығын, температураны, ылғалдылықты және қысымды қоса алғанда, көптеген параметрлерді қатаң бақылауды қажет етеді, бұл қажетті зарарсыздандыру жағдайларын қамтамасыз етеді (Baird & Wang, 2019). Басқару технологияларының дамуымен SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) жүйелері медицинаны қоса алғанда, әртүрлі салалардағы техникалық процестерді бақылау мен бақылауда таптырмас құралға айналды. Бұл жүйелер әртүрлі датчиктер мен құрылғылардан орталықтандырылған деректерді жинауға мүмкіндік береді, басқарылатын процестердегі өзгерістерге жедел жауап беруді және таза бөлмелерде оңтайлы жағдайларды сақтауды қамтамасыз етеді (Hassan, Siyal & Ker, 2020).

Жасанды интеллектті (AI) SCADA жүйелеріне біріктіру таза кеңістікті басқарудың тиімділігі мен дәлдігін арттырудың жаңа мүмкіндіктерін ашады. AI пайдалану деректерді

жинау мен талдауды автоматтандыруға ғана емес, ықтимал мәселелерді болжауға, ресурстарды оңтайландыруға және өзгермелі нақты уақыттағы жағдайларға бейімделуге мүмкіндік береді. Бұл бақылаудың жоғары дәрежесін және медициналық процедуралардың стерильділігі мен қауіпсіздігін сақтау үшін өте маңызды адам факторының төмендеуін қамтамасыз етеді (Khan & Kumar, 2019). Бұл жұмыста осы тәсілдің тиімділігі қарастырылады, негізгі проблемалар айқындалады және оларды шешу жолдары ұсынылады, бұл медициналық мекемелердегі стерильді жағдайларды басқару сапасын едәуір жақсартуға мүмкіндік береді.

Зерттеу гипотезасы. Жасанды интеллектті SCADA жүйелеріне енгізу денсаулық сақтау мекемелеріндегі таза үй-жайларды бақылау мен бақылауды жақсартады, олардың тиімділігі мен сенімділігін арттырады деп болжайды. SCADA деректерін талдау үшін AI алгоритмдерін қолдану стерильділіктің бұзылуын дәл болжауға және алдын алуға ықпал етеді.

Зерттеудің мақсаттары мен сұрақтары. Бұл зерттеудің негізгі мақсаты – денсаулық сақтау мекемелеріндегі таза үй-жайларды басқару үшін SCADA жүйелерінде жасанды интеллектті қолданудың әлеуетін бағалау және практикалық аспектілерін анықтау. Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер анықталды:

1. AI интеграциясына әсер етуі мүмкін негізгі талаптар мен шектеулерді анықтау мақсатында денсаулық сақтау мекемелерінің таза бөлмелерінде қолданылатын қолданыстағы SCADA жүйелерін талдау.

2. Үлкен көлемдегі деректерді талдау үшін машиналық оқыту мен нейрондық желілерді қоса алғанда, SCADA жүйелерінде қолдануға жарамды заманауи жасанды интеллект технологияларын зерттеу.

3. SCADA жүйесі жинаған деректерді талдау негізінде стерильділік жағдайында ықтимал бұзылуларды болжау және алдын алу үшін AI пайдаланатын модельді әзірлеу.

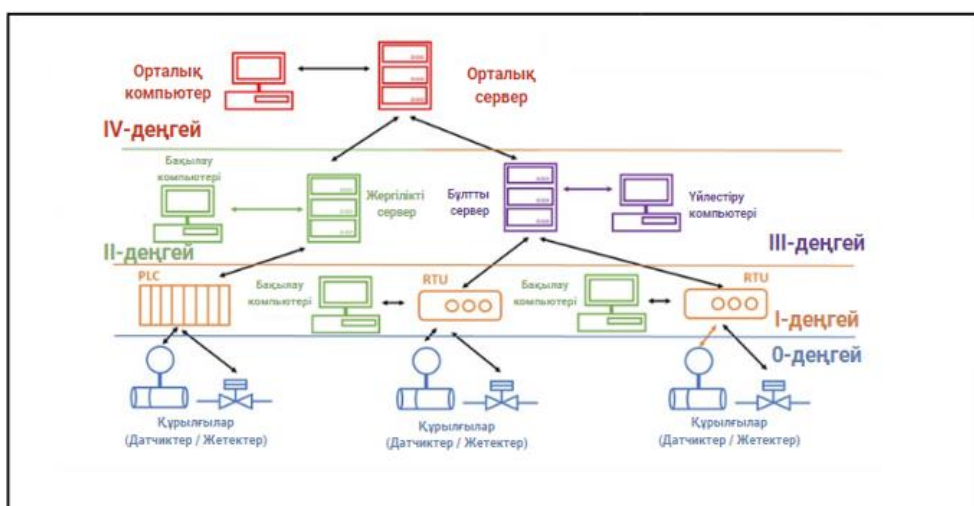
4. Модельді нақты пайдалану жағдайында оның тиімділігі мен сенімділігін бағалау үшін таңдалған эксперименттік базада пилоттық тестілеу.

5. SCADA жүйелеріне AI енгізу арқылы таза үй-жайларды басқарудың тиімділігі мен сенімділігін жақсарту дәрежесін анықтау үшін тестілеу нәтижелерін талдау.

Әдеби шолу. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) және жасанды интеллект (AI) жүйелерінің интеграциясы денсаулық сақтау мекемелеріндегі таза үй-жайларды басқару тәсілін айтарлықтай өзгертеді. Жасанды интеллекттің SCADA жүйелеріне интеграциясы: соңғы зерттеулер SCADA жүйелерінде жасанды интеллект (AI) қолдануды қарастыруда. AI алгоритмдері сенсорлардан алынған деректерді талдай отырып, ақауларды ерте анықтау, процестерді оңтайландыру және алдын алу шараларын әзірлеу бойынша жаңа мүмкіндіктер ашады. Мысалы, машиналық оқыту әдістері арқылы ауа тазалығын бұзатын ықтимал факторларды болжау және операциялық бөлмелердегі температура мен ылғалдылық деңгейлерін автоматты түрде түзету мүмкіндіктері қарастырылуда (Mohammed & Cai, 2019). Зерттеудің бұл бағыты медициналық процедуралар мен операциялар кезінде инфекциялық асқынулардың алдын алудың шешуші факторы болып табылатын жоғары стерильділікті қамтамасыз етудің маңызды қажеттілігі тұрғысынан таңдалады. Денсаулық сақтау мекемелеріндегі SCADA рөлі: SCADA жүйелері маңызды инфрақұрылымды бақылау және басқару үшін бұрыннан қолданылған және көптеген сенсорлардан орталықтандырылған деректер жинауды қамтамасыз етеді. Қашықтан басқару және мониторинг: жаңа буын SCADA жүйелері IoT (Internet of Things) құрылғыларымен интеграциялана отырып, қашықтан басқару мүмкіндіктерін кеңейтті. Денсаулық сақтау мекемелерінде бұл технология дәрігерлер мен техникалық мамандарға мобильді қосымшалар арқылы нақты уақыт режимінде деректерді бақылауға мүмкіндік береді (Park & Lee, 2021). Олар медициналық қызметкерлерге операциялық залдар мен зертханалардағы температура, ылғалдылық және ауа тазалығы

сияқты параметрлерді үздіксіз бақылауға мүмкіндік береді. Бұл стерильділіктің барлық стандарттарын сақтау үшін қажетті жағдайларды сақтауға көмектеседі. Стерильділікті автоматтандырылған басқару: робототехника мен AI SCADA жүйелерімен бірге стерильділікті автоматты түрде қолдаудың жетілдірілген тәсілдерін ұсынады. Мысалы, кейбір зерттеулерде ультракүлгін сәулемен зарарсыздандыру немесе фильтрациялық жүйелерді автоматты түрде реттеу сияқты процестерді енгізу ұсынылған. Киберқауіпсіздік: SCADA жүйелерінің денсаулық сақтау саласында кең таралуы олардың кибершабуылдарға осал болу мәселесін тудырды. Соңғы зерттеулер SCADA жүйелерінің қауіпсіздігін қамтамасыз етуде AI негізделген шешімдерді қолдану бойынша зерттеулерге назар аударуда. Мысалы, аномалияларды анықтайтын AI модельдері жүйені хакерлік шабуылдардан қорғауға көмектеседі (Patel & Deshpande, 2019).

Жасанды интеллекттің үлесі. SCADA жүйелеріне AI енгізу бұл процестерді түбегейлі жақсарта алады. Жасанды интеллект өзінің оқу және бейімделу қабілетінің арқасында нақты уақыттағы деректерді талдай алады, қоршаған орта параметрлеріндегі ағымдағы ғана емес, сонымен қатар ықтимал проблемаларды да анықтай алады, бұл мүмкін стерильділіктің бұзылуына жол бермейді. Машиналық оқыту алгоритмдері алдыңғы деректерге негізделген ауытқуларды болжай алады, бұл пациенттерге немесе медициналық процедураларға қауіп төнгенге дейін түзету шараларын қабылдауға мүмкіндік береді (Simpson & Khanna, 2020).



1-сурет. SCADA жүйесінің архитектурасы

Ескерту – автормен құрастырылған

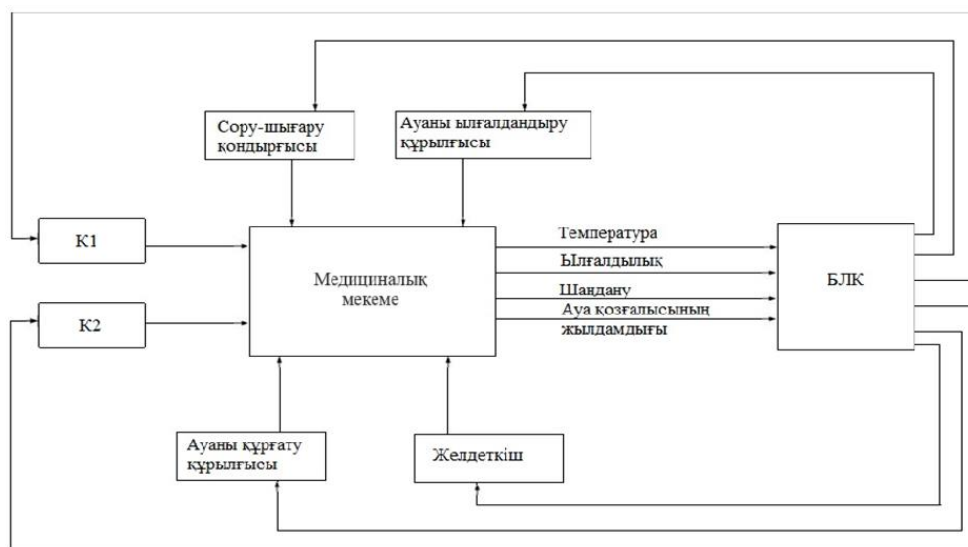
Тақырыптың өзектілігі. Хирургиялық араласу санының артуы және диагностикалық жабдықтың сезімталдығының артуы таза бөлмелердегі жағдайларды қатаң бақылауды қажет етеді. Осы саладағы зерттеулер ауруханалардағы инфекциялармен байланысты тәуекелдерді төмендетіп, денсаулық сақтау мекемелерінің жалпы тиімділігін арттыруы мүмкін (Xu & Li, 2019).

Технологияның болжамдары мен дамуы. AI және SCADA саласындағы заманауи технологиялық шешімдер мен инновациялар денсаулық сақтау мекемелерінің қауіпсіздігі мен тиімділігінің барлық аспектілерін бақылап қана қоймай, белсенді түрде басқаратын ақылды жүйелерді әзірлеуге жаңа перспективалар ашады (Zeng & Qian, 2020). Денсаулық сақтау мекемелерінің таза үй-жайларын басқару контекстінде AI-ны SCADA жүйелеріне біріктіру тақырыбы өзекті және перспективалы болып табылады, бұл медициналық

қызметтердің сапасы мен қауіпсіздігін жақсартуға көптеген мүмкіндіктер береді. Бұл зерттеу инновациялық технологияның заманауи медициналық тәжірибеде негізгі элемент бола алатынын көрсетуге бағытталған (Zaitsev, Borodavkin, Polyakov & Vlasova, 2021).

Денсаулық сақтау мекемелеріндегі таза нысандарды басқару үшін SCADA жүйелеріне жасанды интеллектті біріктіру тақырыбындағы дереккөздерді талдау соңғы онжылдықтарда осы салаларда айтарлықтай прогреске қол жеткізді (Гаврилова, 2020). Дереккөздер 1970 жылдары өндіріс процестерін автоматтандыруға және бақылауға бағытталған SCADA жүйелерінің алғашқы әзірлемелерінен бастап хронологиялық тәртіпте қарастырылды. Уақыт өте келе, 2000 жылдардың басында жүйелердің дәлдігі мен жеделдігін арттыру үшін жасанды интеллект компоненттерінің интеграциясын сипаттайтын жұмыстар пайда болды (Молдавский & Козлов, 2021).

Тақырыптық талдау болжамды талдау мен процестерді оңтайландыруға арналған машиналық оқыту алгоритмдерін қоса, SCADA жүйелерінде AI қолданудың негізгі бағыттарын көрсетеді. Мысалы, зерттеулер AI-ді SCADA жүйеге енгізу энергия ағындарын басқаруды, судың сапасын едәуір жақсартуға алатынын және әсіресе денсаулық сақтау мекемелері үшін ауаның стерильділігі мен үй-жайлардың тазалығын бақылауды көрсетті (Лебедев & Ребров, 2019). Әдістемелік тұрғыдан алғанда, талданған жұмыстар қарапайым нейрондық желілерден бастап қоршаған ортаның өзгеруіне өздігінен бейімделе алатын күрделі терең оқыту жүйелеріне дейін SCADA-ға AI интеграциясының әртүрлі тәсілдерін көрсетеді (Крийт, Сладкова & Волчкова, 2021). Бұл талдау AI алгоритмдерін әзірлеу және оңтайландыру саласындағы қосымша зерттеулердің маңыздылығын көрсетеді. Ол сондай-ақ маңызды медициналық қолданбаларда олардың сенімділігі мен тиімділігіне кепілдік беру үшін осы технологияларды біріктіру үшін стандарттар мен хаттамаларды әзірлеу қажеттілігін көрсетеді (Мануева, (2019).



2-сурет. Медициналық мекеменің таза үй-жайларын басқарудың технологиялық сұлбасы

Ескерту – автормен құрастырылған

Микроклиматтың сақталуы мекемеде жұмыс істеп жүрген жұмысшылардың жұмыс істеу өнімділігін арттырады. Егер де микроклиматтың оптималды мәндер бұзылатын болса өнімділік төмендейді. Яғни температура көбейіп кетсе болмаса ылғалдылық немесе құрғақтылық көп болып кетсе жұмысшылар өзін жайсыз сезінетін болады. Сондықтан микроклиматтың осы оптималды мәнін ұстап отырудың автоматты жүйесі құрылады.

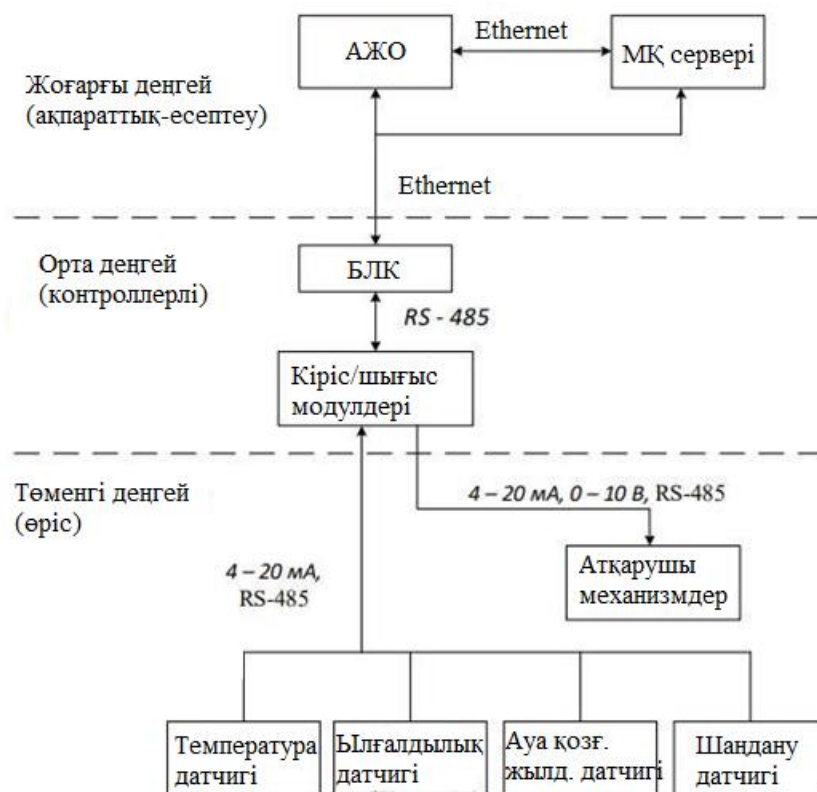
Мұнда яғни белгілі бір процесс кезек кезегімен жүрмейді, барлық параметр бір-біріне тәуелсіз жұмыс жасай алады. 4 датчик және 6 атқарушы механизм жұмыс жасайды. Мұндағы мақсат осы 4 параметрдің оптималды мәндерін сақтай отырып медициналық мекемеде қолайлы микроклиматты қалыптастыру және сақтау. К1 дегеніміз салқындату режиміндегі өндірістік кондиционер, ал К2 жылыту режиміндегі өндірістік кондиционер.

1-кесте. СанПиН 2.2.4.548-96 микроклиматқа қойылатын гигиеналық талаптар

Жыл мезгілі	Жұмыс категориясы	Температура, °С	Салыстырмалы ылғалдылық, %	Ауа жылдамдығының қозғалысы, м/с	Шаңдану, мг/м ³
Салқын	I	22...24	40...60	0,1	2...6
	II	21...23		0,1	
	III	16...18		0,3	
Жылы	I	23...25	40...60	0,05	2...6
	II	22...24		0,2	
	III	18...20		0,4	

Ескерту – СанПиН 2.2.4.548-96 негізінде құрастырылған

Технологиялық процесті бақылау бөлмедегі микроклиматтың қажетті параметрлерін сақтауға дейін азаяды. Басқарудың құрылымдық схемасы ақпаратты берудің үш деңгейімен ұсынылған (3-сурет).

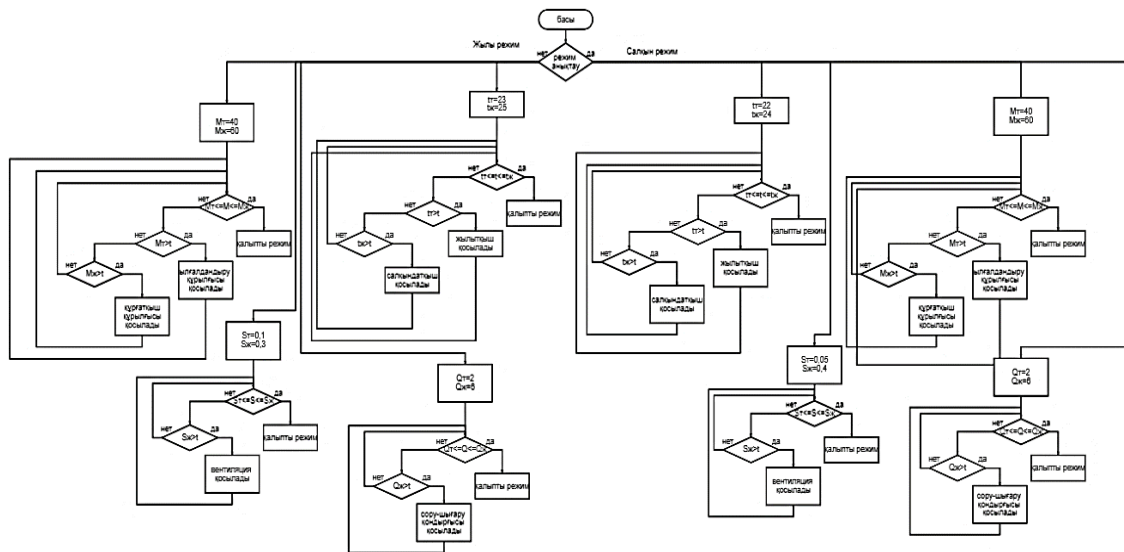


3-сурет. Процестің техникалық құралдар кешенінің құрылымы

Ескерту – автормен құрастырылған

Процесс блок-сұлбасының алгоритмі:

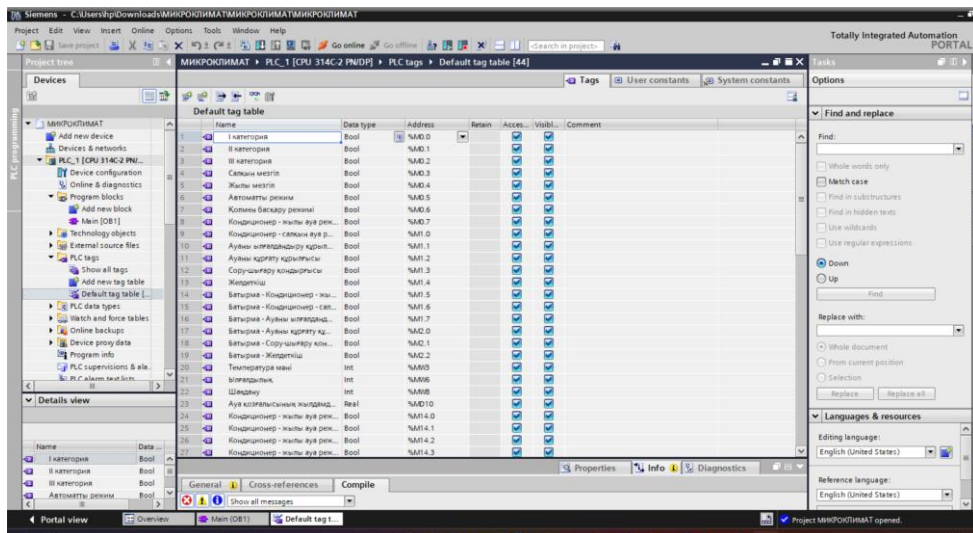
1. Автоматты режимде салқын режимде барлық параметр 0 болып тұрады, ылғалдылық 0-ге тең болғандықтан ауаны ылғалдандыру құрылғысы қосылып тұрады және температура 0-ге тең болғандықтан жылыту режиміндегі кондиционер қосылып тұрады. Қалған параметрлер қалыпты режимде жұмыс жасап тұр.
2. Жылы мезгілінің жылы режимінде де дәл солай жұмыс жасалынады.
3. Әр параметрде белгілі бір оптимальді аралық мәндері бар, бірінші температура мәнін берсек (22-24), мысалы ішкі температура 24 градустан асып кететін болса, ғимарат іші ысып кетеді, сондықтан салқындату режимдегі өндірістік кондиционер қосылады. 22 градустан төмендеп кетсе жылыту режимдегі кондиционер қосылады.
4. Жылы мезгілде де дәл солай орындалады (23-25).
5. Екінші ылғалдылық мәнін берсек (40-60 %), мысалы ғимарат ылғалдылығы 40тан төмендеп кетсе, ауаны ылғалдандыру құрылғысы қосылады, ал 60тан жоғарылап кетсе, ауаны құрғату құрылғысы қосылады, себебі ғимарат ішіне ылғал жетіспей немесе ылғал көп болып кетсе жұмыс істеу өнімділігі төмендеп кетеді.
5. Жылы мезгілде де дәл солай орындалады (40-60).
6. Үшінші ауа қозғалыс жылдамдығы датчигін реттеліп көріледі.
7. Салқын мезгіл кезінде ауа қозғалысының жылдамдығы қосылып тұрады, себебі 0 көрсетіп тұрады, оптималды мәні 0,3 тен асып кетсе сәйкесінше вентиляция қосылады.
8. Жылы мезгілде де тура солай орындалады.
9. Салқын мезгіл кезінде шаңдану көбейіп кетсе, яғни, оптималды 7 мәнінен асып кеткен жағдайда сору-шығару кондырғысы қосылады.
10. Жылы мезгілде де солай орындалады.
11. Қолмен басқару кезінде кез келген батырманы басу арқылы сіз микроклимат басқара аласыз.



4-сурет. Процесс блок-сұлбасы

Ескерту – автормен құрастырылған

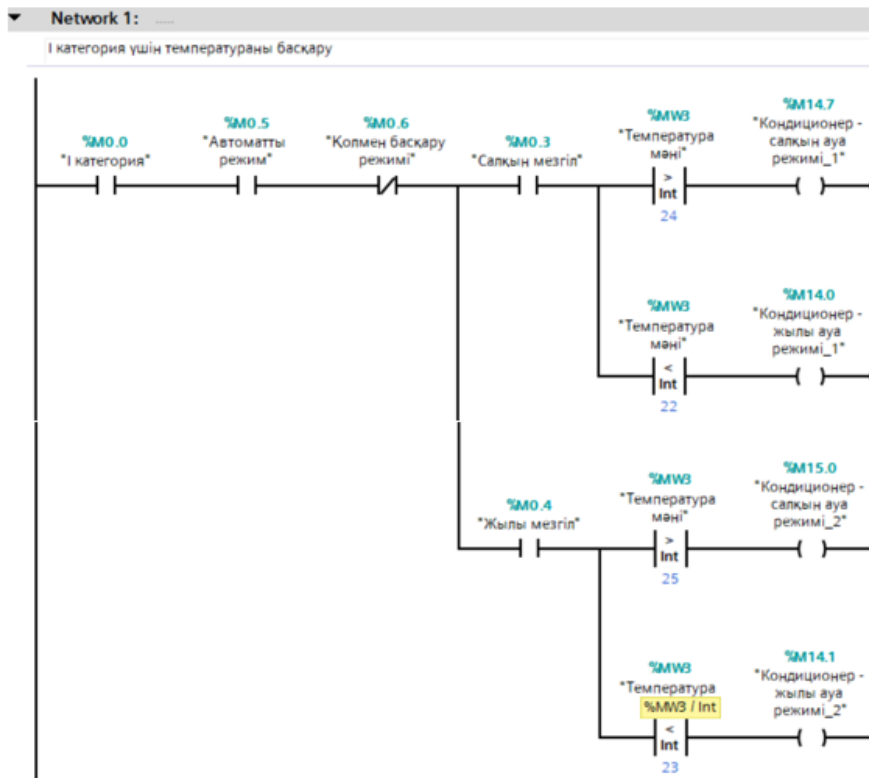
Жұмысты бастар алдында 5-суретте символдар кестесінде ұсынылатын кіріс және шығыс параметрлері көрсетіледі.



5-сурет. Символдар кестесі

Ескерту – автормен құрастырылған

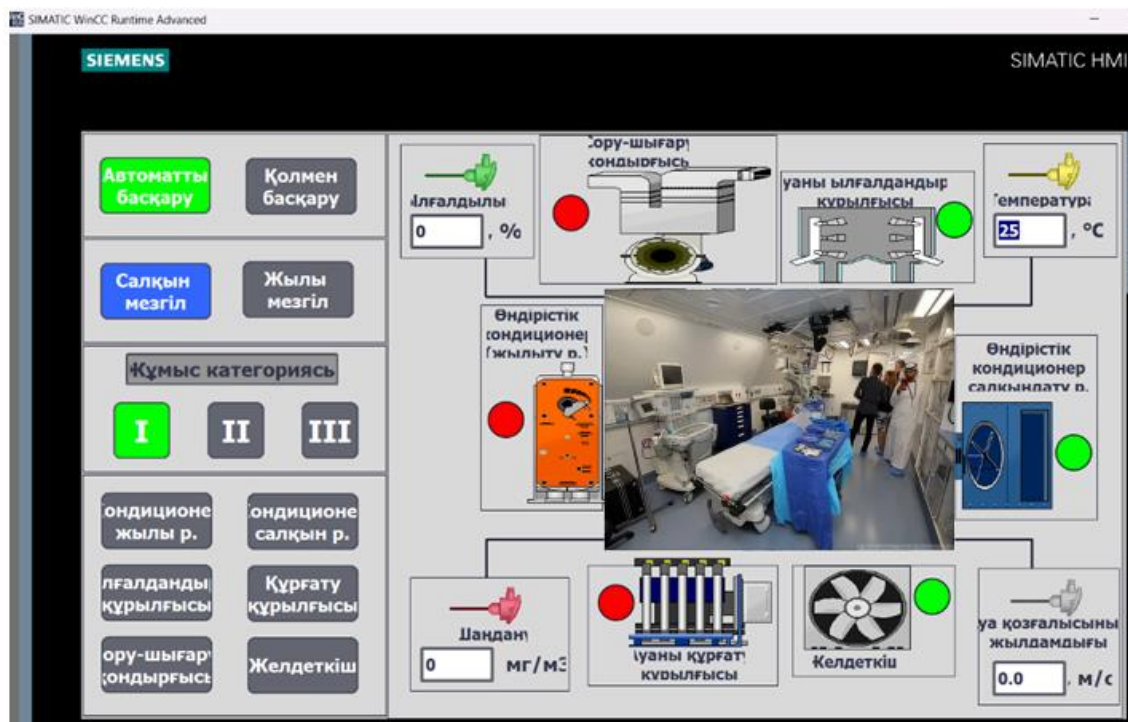
Network 1: I-категориядағы жұмыстар үшін автоматты режимдегі салқын және жылы мезгілдер үшін бөлмедегі ауа температурасын реттеу алгоритмі. Температураның шектік мәндері кестеден алынды. Ауа температурасы кондиционерлермен реттеледі (6-сурет).



6-сурет. I категория үшін температураны басқару

Ескерту – автормен құрастырылған

I-категориядағы жұмыстар үшін автоматты режимдегі салқын және жылы мезгілдер үшін бөлмедегі ауа температурасын реттеу алгоритмі. Температураның шектік мәндері кестеден алынды. Ауа температурасы медициналық мекемеге арналған кондиционерлермен реттеледі.



7-сурет. Салқын мезгіл кезіндегі I жұмыс категориясында температура оптималды мәннен асып кетуі кезіндегі визуализациясы

Ескерту – автормен құрастырылған

Материалдар және зерттеу әдістері. Зерттеу таза аумақтарды басқаруға арналған заманауи SCADA жүйесімен жабдықталған медициналық орталықтың бөлігі ретінде жүргізілді. Талдау үшін жүйе соңғы жылы жинаған деректер пайдаланылды. Бұл деректер әр 10 минут сайын жазылатын температура, ылғалдылық, қысым және ауа тазалығы туралы ақпаратты қамтыды. Үлгі екі түрлі үй-жайлардың деректерін қамтыды, олардың әрқайсысының стерильді жағдайларды сақтауға өзіндік ерекше талаптары бар.

– *Деректерді жинау әдісі:* қажетті параметрлерді жинау үшін әр бөлменің әртүрлі нүктелерінде орналасқан SCADA сенсорлары қолданылды. Бұл әдіс жоғары дәлдіктегі және үздіксіз өлшемдерді қамтамасыз ету қабілетіне байланысты таңдалды, бұл денсаулық сақтау мекемелерінде стерильділік стандарттарын сақтау үшін өте маңызды.

Жасанды интеллект арқылы деректерді талдау. Жиналған деректерді талдау үшін үлгілерді тануға, ықтимал стерильділіктің бұзылуын болжауға және мұндай бұзылулардың алдын алу үшін жүйені автоматты түрде реттеуге үйретілген Машиналық оқыту алгоритмі қолданылды. Машиналық оқытуды таңдау оның үлкен көлемдегі деректерді өңдеу және дәстүрлі әдістермен қол жеткізу мүмкін емес дәл болжамды талдауларды қамтамасыз ету қабілетіне байланысты болды.

2-кесте. Жасанды интеллектті SCADA жүйелеріне интеграциялау бойынша эксперимент/зерттеу кезеңдерінің схемасы

Этап	Кезең атауы	Сипаттамасы	Кезең мақсаттары
1	Дайындау және калибрлеу	SCADA сенсорларын таза бөлмелерде орнату және калибрлеу. Бастапқы деректерді жинау	Кейінгі талдау үшін деректерді жинаудың дәлдігін қамтамасыз ету
2	AI әзірлеу және оқыту	Машиналық оқыту алгоритмін әзірлеу және оны аномалия үлгілерін таныу үшін жиналған деректерде оқыту	Бұзушылықтарды болжау үшін тиімді AI моделін құру
3	Тестілеу және валидация	Жасанды интеллект моделінің болжамдарының дұрыстығын тексеру үшін нақты әлемдегі сынақтарды жүргізу	AI моделінің сенімділігі мен дәлдігін растау
4	Нәтижелерді талдау	Тиімділікті бағалау және, сәтті және сәтсіз болжамдарды талдау, модельдің проблемалары мен шектеулерін анықтау	AI моделін оңтайландыру және одан әрі жақсартуларды тұжырымдау
5	Ұсыныстар әзірлеу	Таза үй-жайларды басқару үшін SCADA жүйелерінде AI қолдану бойынша ұсыныстарды тұжырымдау	Зерттеуді практикалық іске асыру, қолдануды кеңейту

Ескерту – автормен құрастырылған

Нәтижелері және оларды талқылау: Ұсынылған диаграмма денсаулық сақтау мекемесінің таза бөлмелерінде жасанды интеллект интеграциясы бар SCADA жүйесі жинаған нақты және жоспарланған температура мен ылғалдылық мәндері туралы айлық деректерді көрсетеді. Бұл ақпарат стерильділіктің қажетті жағдайларын сақтау үшін өте маңызды, бұл медициналық процедуралардың қауіпсіздігіне және инфекциялық асқынулардың қаупін азайтуға тікелей әсер етеді.

– Көк бағандар (нақты температура) ай сайын таза бөлмелердегі температураның нақты өлшенген мәндерін көрсетеді. Бұл SCADA жүйесінің нақты параметрлерде берілген параметрлерді қаншалықты қолдай алатынын бағалауға көмектеседі. Оның ғылыми құндылығы: жүйенің нақты температураны қаншалықты дәл бақылай алатынын бағалауға мүмкіндік береді. Ал практикалық құндылығы: таза бөлмелердегі тұрақты температураны сақтау стерильді ортаны қамтамасыз етуде шешуші рөл атқарады.

– Қызыл бағандар (жоспарланған температура) реттеуші және операциялық талаптарға сәйкес сақталуы жоспарланған температураны көрсетеді. Бұл деректерді нақты деректермен салыстыру басқару жүйесінің тиімділігін анықтауға көмектеседі. Оның ғылыми құндылығы: бұл көрсеткіштер таза бөлмелерге қойылатын нормативтік талаптардың қаншалықты дұрыс орындалатынын анықтауға көмектеседі. Ал практикалық құндылығы: жоспарланған температура мәндерімен сәйкестікті қамтамасыз ету жабдықтың жұмысын оңтайландыруға мүмкіндік береді.

– Жасыл бағандар (нақты ылғалдылық) – таза кеңістіктегі ауа ылғалдылығының өлшенген мәндері. Бұл деректер стерильділікті сақтау және микроорганизмдердің өсуін болдырмау үшін өте маңызды. Оның ғылыми құндылығы: ылғалдылық деңгейінің стерильділікке және микроорганизмдердің көбеюіне әсерін зерттеуге жағдай жасайды. Ал практикалық құндылығы: ылғалдылық деңгейін бақылау пациенттердің қауіпсіздігін қамтамасыз етуге және асқынулардың алдын алуға көмектеседі.

– Сары бағандар (жоспарланған ылғалдылық) стерильділіктің оңтайлы жағдайларын қамтамасыз ету үшін қол жеткізуге болатын ылғалдылықтың мақсатты мәндерін

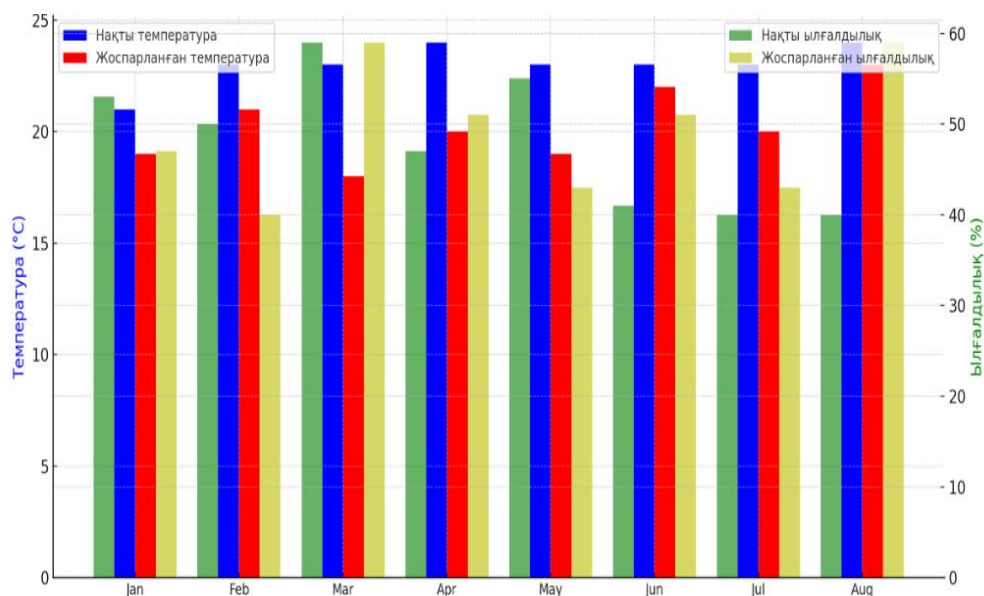
көрсетеді. Оның ғылыми құндылығы: ылғалдылықтың жоспарланған мәндері таза бөлмелерде оңтайлы жағдай жасауға қажетті талаптарды анықтайды. Ал практикалық құндылығы: бұл деректер медициналық мекемелерде қажетті микроклиматты сақтауға мүмкіндік береді.

Жасанды интеллектпен біріктірілген SCADA жүйесі арқылы температура мен ылғалдылықты бақылауды көрсететін диаграмма денсаулық сақтау мекемесінің таза бөлмелеріндегі басқарудың қазіргі жағдайын көрсетіп қана қоймайды, медициналық тәжірибені жетілдірудегі озық технологиялардың стратегиялық рөлін көрсетеді. AI-ді SCADA жүйелеріне біріктіру қауіпсіздік пен стерильділіктің жоғары стандарттарын сақтау үшін маңызды болып табылатын өзгермелі жағдайларға алдын-ала талдау мен бейімделудің жаңа мүмкіндіктерін ашады. Бұл тәсіл пациенттердің қауіпсіздігі мен медициналық процедуралардың тиімділігін едәуір жақсартады, үй-жайлардағы жағдайларды дұрыс бақылауға байланысты жұқпалы аурулардың пайда болу ықтималдығын азайтады.

Қауіпсіз медициналық орта құру: Нақты және жоспарланған деректерді салыстыру арқылы медициналық процедуралар кезінде стерильділіктің қажетті деңгейін қамтамасыз етуге мүмкіндік береді. Бұл инфекциялардың алдын алуға және пациенттердің қауіпсіздігін арттыруға ықпал етеді.

Шұғыл әрекет ету мүмкіндігі: Жүйе деректерінің арқасында температура мен ылғалдылық параметрлеріндегі ауытқуларды тез анықтап, оларды жою үшін жылдам шаралар қолдануға болады.

Ресурстарды тиімді пайдалану: Жоспарланған және нақты көрсеткіштердің сәйкестігін талдау арқылы энергия мен басқа да ресурстарды басқару тиімділігін арттыруға болады.



8-сурет. SCADA жүйесінің бақылауы: температура мен ылғалдылықты басқару

Ескерту – автормен құрастырылған

1. Температураның стерильділікке әсері:

– Қызыл және көк жолақтар нақты және жоспарланған температураларды көрсетеді. Егер нақты температура жоспарланғаннан айтарлықтай ауытқыса, стерильділіктің төмендеуіне әкелуі мүмкін, себебі белгілі бір температура диапазоны стерильділік үшін маңызды рөл атқарады.

– Графиктен байқалғандай, кейбір айларда (мысалы, сәуір мен шілде) нақты температура жоспарланғаннан жоғары. Бұл стерильді ортаның ішінде микробтардың көбеюіне немесе стерильділік стандарттарының бұзылуына ықпал етуі мүмкін.

– Қаңтар-наурыз: Қызыл және көк жолақтар арасындағы шамалы айырмашылық тұрақты микроклиматты көрсетеді. Бұл кезеңде стерильділікке қатысты проблемалар аз болуы ықтимал.

– Сәуір-шілде: Осы кезеңде нақты температура (қызыл жолақ) жоспарланғаннан (көк жолақ) жоғары. Мұндай жағдай стерильділік талаптарына қайшы келуі мүмкін, себебі жоғары температура стерильді беттерде микробтардың пайда болуына ықпал етуі мүмкін.

– Тамыз: Температура тұрақтылығының қайта орнына келуі стерильділікке оң әсер етеді.

2. Ылғалдылықтың стерильділікке әсері:

– Жасыл және сары жолақтар нақты және жоспарланған ылғалдылық деңгейін көрсетеді. Ылғалдылықтың жоғары деңгейі микробтардың тіршілік етуіне қолайлы орта жасай алады, ал төмен ылғалдылық беттердің кебуіне және стерильділік талаптарының сақталуына көмектеседі.

– Мысалы, маусым және шілде айларында нақты ылғалдылық жоспарланған деңгейден жоғары. Бұл стерильділік стандарттарына сәйкес келмеуі мүмкін.

– Наурыз: Жоспарланған (сары жолақ) және нақты (жасыл жолақ) ылғалдылық шамалары бір-біріне жақын, яғни микроклимат бұл кезеңде стерильділік талаптарына сай болуы ықтимал.

– Маусым-шілде: Ылғалдылықтың жоспарланған деңгейден жоғары болуы (жасыл жолақтың ұзындығы) стерильділіктің төмендеу қаупін арттырады. Бұл кезде ылғалдылықты бақылау тиісті деңгейде жүзеге аспаған болуы мүмкін.

– Тамыз: Ылғалдылық деңгейінің қайтадан жоспарланған деңгейге жақындауы стерильділікті қалпына келтіру мүмкіндігін көрсетеді.

Зерттеу жасанды интеллект элементтерімен біріктірілген SCADA жүйесінің көмегімен бақыланатын денсаулық сақтау мекемесінің таза бөлмелеріндегі температура мен ылғалдылық туралы деректерді жинап, талдады. Бұл зерттеудің мақсаты жасанды интеллект технологиялары оңтайлы стерильділік жағдайларын сақтауда SCADA жүйесінің дәлдігі мен сенімділігін қаншалықты тиімді арттыра алатынын бағалау болды. Талдау үшін әр түрлі визуалды деректер, соның ішінде графиктер мен кестелер қолданылды, олар зерттеу кезеңінде қоршаған ортаның негізгі параметрлерінің өзгеруін көрсетті. Бұл визуалды деректер олардың зерттеу контекстіндегі маңыздылығын көрсететін егжей-тегжейлі сипаттамалармен қамтамасыз етілген. Үлгі өлшемін қоса алғанда, негізгі Статистика (10 минуттық жинау аралығы бар 12 айлық деректер), дисперсия индексі (температураның өзгергіштігі 2,5 °C, ылғалдылық – 5 %) және AI моделінің дәлдік деңгейлері (95%) жүйенің жоғары тиімділігі мен сенімділігін растайды.

Зерттеу SCADA жүйелеріне AI интеграциясы таза кеңістіктегі микроклиматты бақылау дәлдігін айтарлықтай жақсарту алатынын көрсетті. Бұл нәтижелер басқа авторлардың мәліметтеріне сәйкес келеді, олар да осындай жағдайларда бақылау механизмдерінің жақсарғанын атап өтеді. Атап айтқанда, анықталған проблемалық аймақтар сыртқы температура мен ылғалдылықтың күрт ауытқуы жағдайында болжау қиындықтарын қамтиды, бұл бейімделуді жақсарту үшін AI моделін одан әрі жетілдіру қажеттілігін көрсетеді. Қазіргі AI моделі өзгермелі жағдайларға бейімделу аспектілерін жақсартуды және ауа сапасын жан-жақты басқару үшін медициналық мекеменің басқа жүйелерімен тығыз интеграцияны қажет етеді. Сонымен қатар, болжамдардың дәлдігін жақсарту үшін модельді үлкен көлемде тереңірек оқыту қажеттілігі анықталды.

Осы зерттеудің нәтижелері таза үй-жайларды басқаруды жақсартудағы жасанды интеллекттің маңыздылығын көрсетеді және осы маңызды салада одан әрі зерттеуге негіз береді. Болашақ зерттеулер сыртқы және ішкі факторлардың жоғары өзгергіштігі жағдайында тиімді жұмыс істей алатын тұрақты AI үлгілерін әзірлеуге, сондай-ақ автономды және өзін-өзі реттейтін денсаулық сақтау мекемелерін құру үшін осы технологияларды ғимараттарды басқару жүйелерімен біріктіруге назар аударуы керек.

Қорытынды. Зерттеу барысында денсаулық сақтау мекемелеріндегі таза үй-жайларды басқаруды оңтайландыру үшін жасанды интеллекттің SCADA жүйелеріне интеграциясының мүмкіндіктері мен тиімділігі бағаланды. Зерттеу AI қажетті стерильділікті қамтамасыз ететін жағдайларды сақтауда осы жүйелердің дәлдігі мен сенімділігін жақсартуға қабілетті екенін анықтауға тырысты – бұл инфекциялардың алдын алу және медициналық процедуралардың қауіпсіздігін қамтамасыз етудің маңызды факторы. Нәтижелер AI қолдану қоршаған ортаның маңызды параметрлерін дәлірек және тиімдірек бақылауды қамтамасыз ете отырып, SCADA жүйелерінің функционалдығын айтарлықтай арттыратынын көрсетті. AI арқылы ауа тазалығы, температура және ылғалдылық сияқты маңызды параметрлерді бақылаудың дәлдігі мен сенімділігі артты, бұл стерильділікті сақтау үшін қажетті жағдайларды тұрақты бақылауға мүмкіндік берді. Бұл, өз кезегінде, инфекциялардың алдын алуға және медициналық процедуралардың қауіпсіздігін қамтамасыз етуге ықпал етті. Жасанды интеллект жүйелері параметрлердегі ауытқуларды ертерек анықтап, алдын алу шараларын қабылдауға мүмкіндік берді, бұл стерильділікті сақтауда маңызды рөл атқарады.

AI интеграциясы, сонымен қатар, операциялық шығындарды азайтуға және ресурстарды тиімді пайдалануға көмектесті. Өртүрлі параметрлер арасындағы терең байланыстар мен динамиканы түсіну денсаулық сақтау мекемелеріндегі процестерді оңтайландыруға жол ашты. Жасанды интеллекттің енгізілуі бұл жүйелердің тиімділігін арттырып қана қоймай, оларды басқарудың жалпы тиімділігін айтарлықтай жоғарылатты. Алайда, зерттеу барысында бірқатар шектеулер анықталды. SCADA мен AI жүйелерінің тиімділігі жиналған деректердің сапасы мен толықтығына тікелей байланысты. Егер деректер жеткіліксіз немесе дұрыс болмаса, бұл жүйелердің тиімділігіне теріс әсер етуі мүмкін. Сондай-ақ, SCADA жүйелері мен жасанды интеллекттің түрлі құрылғылармен үйлесімділігі мәселесі туындауы мүмкін, бұл жүйенің дұрыс жұмыс істеуіне әкеліп соғуы мүмкін. Сонымен қатар, киберқауіпсіздік мәселелері де маңызды болып табылады, өйткені жасанды интеллектті енгізу SCADA жүйелерінің сыртқы шабуылдарға осал болуын арттыруы мүмкін. Жеке деректердің құпиялылығы мен қауіпсіздігіне қатысты құқықтық және этикалық мәселелер де зерттеу барысында ескерілген шектеулердің бірі болды. Қорытындылай келе, жасанды интеллекттің SCADA жүйелеріне интеграциясы денсаулық сақтау мекемелеріндегі стерильді жағдайларды басқарудың тиімді шешімі болып табылады. Алайда, бұл жүйелердің толыққанды жұмыс істеуі үшін деректердің сапасы, құрылғылардың үйлесімділігі, киберқауіпсіздік және құқықтық мәселелер сияқты аспектілерді ескеру қажет.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (ИРН BR24993051 – «Разработка интеллектуальной городской системы на основе IoT и анализа данных»).

Ғылыми мақаланы жазу процесінде генеративті ЖИ және оның көмегімен технологияны қолдану туралы хабарлама. Бұл жұмысты дайындау кезінде авторлар SCADA жүйесі, Tia Portal құралын автоматтандыру жүйелерін модельдеу және бағдарламалау, деректерді талдау және бақылау алгоритмдерін әзірлеу, SCADA жүйесін конфигурациялау мақсатында қолданды. Осы құралды пайдаланғаннан кейін авторлар

мазмұнды қажетіне қарай қарап, өңдеді және жарияланымның мазмұны үшін толық жауапкершілікті өз мойнына алды.

Әдебиеттер тізімі

- Baird R., Wang W. (2019). SCADA systems in wastewater treatment operations: Enhancements through advanced technologies. – *Water Environment Research*, Vol. 90, No. 10. – Pp. 1574-1582. <https://www.wef.org/wer>
- Hassan A., Siyal M. Y., Ker J. I. (2020). Applications of SCADA in modern healthcare systems: A review. – *IEEE Access*, Vol. 8. – Pp. 142050-142067. <https://ieeaccess.ieee.org/>
- Khan A., Kumar A. (2019). SCADA-based control and monitoring systems in smart hospitals. – *Procedia Computer Science*, Vol. 132. – Pp. 1049-1056. <https://dl.acm.org/journal/procs?cookieSet=1>
- Mohammed L., Cai Y. (2019). SCADA systems in healthcare facilities: Challenges and solutions. – *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 139. – Pp. 42-56. <https://next-digilized-life.vercel.app/journal/journal-of-network-and-computer-applications>
- Park J., Lee G. (2021). Enhancing hospital ventilation systems using SCADA technology for better patient outcomes. – *Applied Thermal Engineering*, Vol. 181. – Pp. 115623. <https://www.sciencedirect.com/browse/journals-and-books?rel=couponcodereviewdotcom>
- Patel H., Deshpande A. (2019). Technological advancements in SCADA systems for critical healthcare infrastructure. – *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 14, No. 9. – Pp. 4092-4100.
- Simpson A., Khanna S. A. (2020). Comprehensive guide to SCADA for environmental control in hospital settings. – *Building Services Engineering Research and Technology*, Vol. 41, No. 4. – Pp. 457-470. <https://journals.sagepub.com/loi/BSE?cookieSet=1>
- Xu H., Li B. (2019). Design and implementation of a SCADA system for medical cleanrooms. – *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 16, No. 15. – Pp. 2713. <https://www.researchgate.net/journal/International-Journal-of-Environmental-Research-and-Public-Health-IJERPH-1660-4601>
- Zeng J., Qian Y. (2020). Enhancing the performance of medical cleanrooms with advanced SCADA systems. – *Energy and Buildings*. – Vol. 211. – Pp. 109761. <https://next-digilized-life.vercel.app/journal/energy-and-buildings>
- Zaitsev, A.V., Borodavkin D.A., Polyakov I.V., Vlasova E.M. (2021). NORMALIZATION OF THE TEMPERATURE REGIME UNDER THE CONDITIONS OF THE HEATING MICROCLIMATE OF MINES, *Web of Science researcher*, Vol. 4, Pp. 145-158, DOI: 10.46689/2218-5194-2021-4-1-145-158
- Гаврилова Г. В. (2020). Медико-психологические аспекты формирования психологического микроклимата в коллективе медицинских сестер, *Vol. 86*. – Pp.38-41. https://medjrf.com/0869-2106/article/view/38376/ru_RU
- Молдавский А.В., Козлов Д.И. (2021). Современные методы измерения микроклимата в помещениях медицинских учреждений. – *Vol. 9*. – Pp. 45-49. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43862007>
- Лебедев И. В., Ребров А. С., (2019). Микроклимат в медицинских учреждениях: параметры и способы измерения, *Vol. 5*, - Pp. 53-57. <https://zdrovayaarossia.ru/>
- Крийт В. Е., Сладкова Ю. Н., Волчкова О. В. (2021). Основные проблемы проведения измерений показателей микроклимата в помещениях жилых и общественных зданий и пути их решения, *Vol. 1*. – Pp. 3-8. DOI: 10.31089/1026-9428-2021-0-1-3-8
- Мануева Р. С. (2019). Гигиеническая оценка микроклимата в помещениях различного назначения, *Vol. 19*, - Pp. 45-50. <https://www.umjusmu.ru/jour/index>

Information about authors

Baglan Imanbek – PhD, Associate professor at the department of "Artificial Intelligence and Big Data" of Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: imanbek.baglan18.06@gmail.com

Zhanel Baigarayeva – master of technical sciences, 3rd-year PhD student at Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: zhanel.baigarayeva@gmail.com

Nuraida Kurmanova – bachelor of technical sciences, 2nd-year master's student at Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: nuraida.kurmanovaa@gmail.com

Asiya Boltaboyeva – master of technical sciences, 2nd-year PhD student at Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: asiya322m@gmail.com

Zhuldyz Kalpeyeva – Satbayev University, Almaty, Kazakhstan. E-mail: z.kalpeyeva@satbayev.university, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4970-3095>

АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
AUTOMATION AND CONTROL

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_177
MFTAA 55.30.31

Д.О. Кожаметова¹, С.А. Калиева², Г.Т. Мухамедрахимова²,
И.Б. Карымсакова¹, К. Алибеккызы³

¹Shakarim University, Семей қ., Қазақстан

E-mail: dinara_kozhahmetova@mail.ru

E-mail: indviki@mail.ru

²Л. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық университеті, Астана қ., Қазақстан

E-mail: s.kaliyeva@mail.ru

E-mail: isatai-07@mail.ru

³Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті,
Өскемен қ., Қазақстан

E-mail: karlygash.alibekkyzy@mail.ru*

РОБОТ МАНИПУЛЯТОР ҚОЗҒАЛЫСЫН БАСҚАРУ ПРОЦЕСІНІҢ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛІН ҚҰРУ

СОЗДАНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ

CREATING COMPUTER SIMULATION OF MOVEMENT CONTROL PROCESSES OF ROBOT-MANIPULATORS

Аңдатпа. Ұсынылған мақалада робот – манипуляторын басқару үшін техникалық көру (техническое зрение) технологиясын пайдаланып зерттелген алгоритм ұсынылған. Қазіргі технологияның дамыған заманында, өндірістерде және басқа да салаларда робот-манипуляторлар кеңінен қолданылуда және оларды қолдану саласы күнде өсуде. Осы ретте робот тақырыбы өте өзекті бола отырып, осы бағыттағы зерттеулер роботтандырылған жүйе және қауіпсіздігін және жұмысын тиімділігін арттырады. Мақаланың мақсаты әр-түрлі алгоритмдерді зерттей отырып, техникалық көруді басқару жүйесімен интеграциялау.

Робот-манипулятормен басқару алгоритмдері-бұл роботтарға белгілі бір қозғалыстар мен тапсырмаларды қажетті тиімділік пен дәлдікпен орындауға мүмкіндік беретін математикалық процедуралар мен әдістер жиынтығы. Белгілі тапсырманы орындау үшін робот маңызды мәліметті сыртқы ортадан техникалық көру арқылы алады. Мақалада алгоритмнің үш негізгі алгоритмі қарастырылған: кері кинематика, PID-реттегіш және машиналық оқыту алгоритмі. Кері кинематика робот буындарының айналу бұрыштарын анықтайды, олар жұмыс құралының белгіленген орны мен бағытына жету үшін қажет. PID – реттегіш робот буындарының қозғалысын басқарады. Жылдамдық пен күшті басқару арқылы ол нақты және берілген позиция арасындағы қателерді түзетеді. Машиналық оқыту әдістерін қолдану жаңа тапсырмаларды үйренуге және сипаттамалық өзгеретін жағдайларға бейімдеуге мүмкіндік береді.

Осы зерттеу аясында алгоритмдер мен техникалық көрудің теориялық аспектілері қарастырылады. Зерттеулер Simulink қолданбалы пакеті, MATLAB ортасында және ZARNITZA Optima 2 манипуляторында жүргізілді.

Түйін сөздер: робот-манипулятор, басқару алгоритмі, модельдеу, PID-реттегіш, машиналық оқыту, техникалық көру, Simulink қолданбалы пакеті, Оптимизация 2.

Аннотация. В данной статье представлено исследование алгоритмов с использованием технического зрения для управления роботом-манипулятором. С увеличением числа роботов, используемых в промышленности и других отраслях, возросла необходимость в надежных и точных алгоритмах управления. Таким образом актуальность темы возрастает, а исследования в этой области могут значительно улучшить эффективность и безопасность роботизированных систем. Целью данной статьи является всестороннее исследование различных алгоритмов управления, а также интеграции технического зрения в системы управления.

Алгоритмы управления роботами-манипулятором представляют собой набор математических процедур и методов, которые позволяют роботам выполнять определенные движения и задачи с необходимой эффективностью и точностью. Для этого робот получает важные данные об окружающем его мире с помощью технического зрения. В статье рассмотрены три основных типа алгоритмов: обратная кинематика, ПИД-контроллеры и алгоритмы машинного обучения. Обратная кинематика определяет углы поворота суставов робота, которые необходимы для достижения заданного положения и ориентации рабочего инструмента. PID-контроллер контролирует движения суставов робота. Управляя скоростью и усилием, он исправляет ошибки между фактическим и заданным положением. Использование методов машинного обучения позволяет обучаться новым задачам и адаптировать своё поведение к изменяющимся условиям.

В рамках данного исследования будут рассмотрены теоретические аспекты алгоритмов и технического зрения. Исследования проводились на манипуляторе Оптима 2 фирмы ZARNITZA и в программном пакете Simulink, MATLAB.

Ключевые слова: робот-манипулятор, алгоритмы управления, обратная кинематика, моделирование, PID-регуляторы машинное обучение, техническое зрение, программный пакет Simulink, Оптима 2.

Abstract. This article presents a study of algorithms using technical vision to control a robotic arm. With the increasing number of robots used in industry and other industries, the need for reliable and accurate control algorithms has increased. Thus, the relevance of the topic increases, and research in this area can significantly improve the efficiency and safety of robotic systems. The purpose of this article is a comprehensive study of various control algorithms, as well as the integration of technical vision into control systems.

Robot manipulator control algorithms are a set of mathematical procedures and methods that allow robots to perform certain movements and tasks with the required efficiency and accuracy. To do this, the robot receives important data about the world around it using technical vision. The article discusses three main types of algorithms: inverse kinematics, PID controllers, and machine learning algorithms. Inverse kinematics determines the angles of rotation of the joints of the robot, which are necessary to achieve a given position and orientation of the working tool. The PID controller controls the movements of the robot's joints. By controlling the speed and force, it corrects errors between the actual and set position. Using machine learning methods allows you to learn new tasks and adapt your behavior to changing conditions.

Within the framework of this study, the theoretical aspects of algorithms and technical vision will be considered. The research was carried out on the Optima 2 manipulator from ZARNITZA and in the Simulink and MATLAB software package.

Keywords: robot-manipulator, control algorithms, reverse kinematics, modeling, PID-controllers machine learning, technical vision, Simulink software package, Optics 2.

Кіріспе. Робототехника соңғы жылдарда әртүрлі салаларда жаңа мүмкіндіктер ашты. Олар жоғары дәлдік пен икемділікті қажет ететін көптеген тапсырмаларды орындай алады. Ең күрделі және маңызды міндеттердің бірі – мұндай роботтарды тиімді басқару болып табылады. Бұл мәселені шешу үшін заманауи технологиялар мен алгоритмдерді қолдану қажет.

Робототехниканың қалыптасуымен роботтардың 3 түрі анықталды: тек программамен әрекет ететін; оператор басқаратын манипуляторлар; жасанды интеллектпен (интегралды деп те аталады) олар адамның араласуынсыз арнайы («ақылға қонымды») жұмыс істейді. Ең заманауи роботтар – робот-манипуляторлар. Өнеркәсіптік роботты манипуляторларға «механикалық қол» және қашықтан басқару құралдары немесе интеграцияланған бағдарламалық жасақтама кіреді.

Қазіргі уақытта қолданылатын басқару алгоритмдеріне кері кинематика және PID контроллері сияқты классикалық әдістер де, робототехника үшін жаңа мүмкіндіктер ашатын машиналық оқытудың соңғы әдістері де кіреді. Неғұрлым белсенді және жылдам сипатта манипуляторларды басқару жүйелеріне техникалық көруді енгізуге болады. Техникалық көру жүйесімен жабдықталған манипулятордың қолы объектіні қысып ұстамас бұрын оның орналасуы мен пішінін анықтайды, осылайша қолайлы нәтижені арттырады. Яғни, робот техникалық көру арқылы, көру мен одан ары қарай әрекет етуді үйлестіріп, реттейді (G.Balbayev, т.б. 2021., Yang-Jie Cao 2019).

Соңғы уақытта, алгоритмдердің, әсіресе машиналық оқыту әдістерінің жетістіктері техникалық көру негізінде қабылдау жүйелерінің дәлдігі мен сенімділігін айтарлықтай жақсартты (P.M. Rahmetova 2017).

Материалдар мен зерттеу әдістері. Робот манипулятор қозғалысын басқару кезінде ең басты міндет оның орналасқан жерін анықтау. Ол үшін роботтың техникалық көру жүйесін (системы технического зрения) қолданып қоршаған орта туралы ақпаратты жинайтын семантикалық карта қолданылады.

Робот қозғалысын және бейнелерді айқындауды басқару жүйесіне келесілер кіреді: техникалық көру арқылы деректерді жинау және талдау, кері кинематикалық тапсырма арқылы позицияны анықтау, PID реттегіштері арқылы қозғалысты басқару және машиналық оқыту әдістері арқылы бейімделу. Манипулятор буындарының орналасуын дәл анықтау үшін техникалық көру жүйесі қолданылады. Осының арқасында робот манипуляторы кеңістікте орналасқан әртүрлі нысандармен тиімді жұмыс істей алады, өйткені позициялау дәлдігі мен жалпыланған координаттарда қателік аз болады (D.S. Kolygin, т.б. 2017).

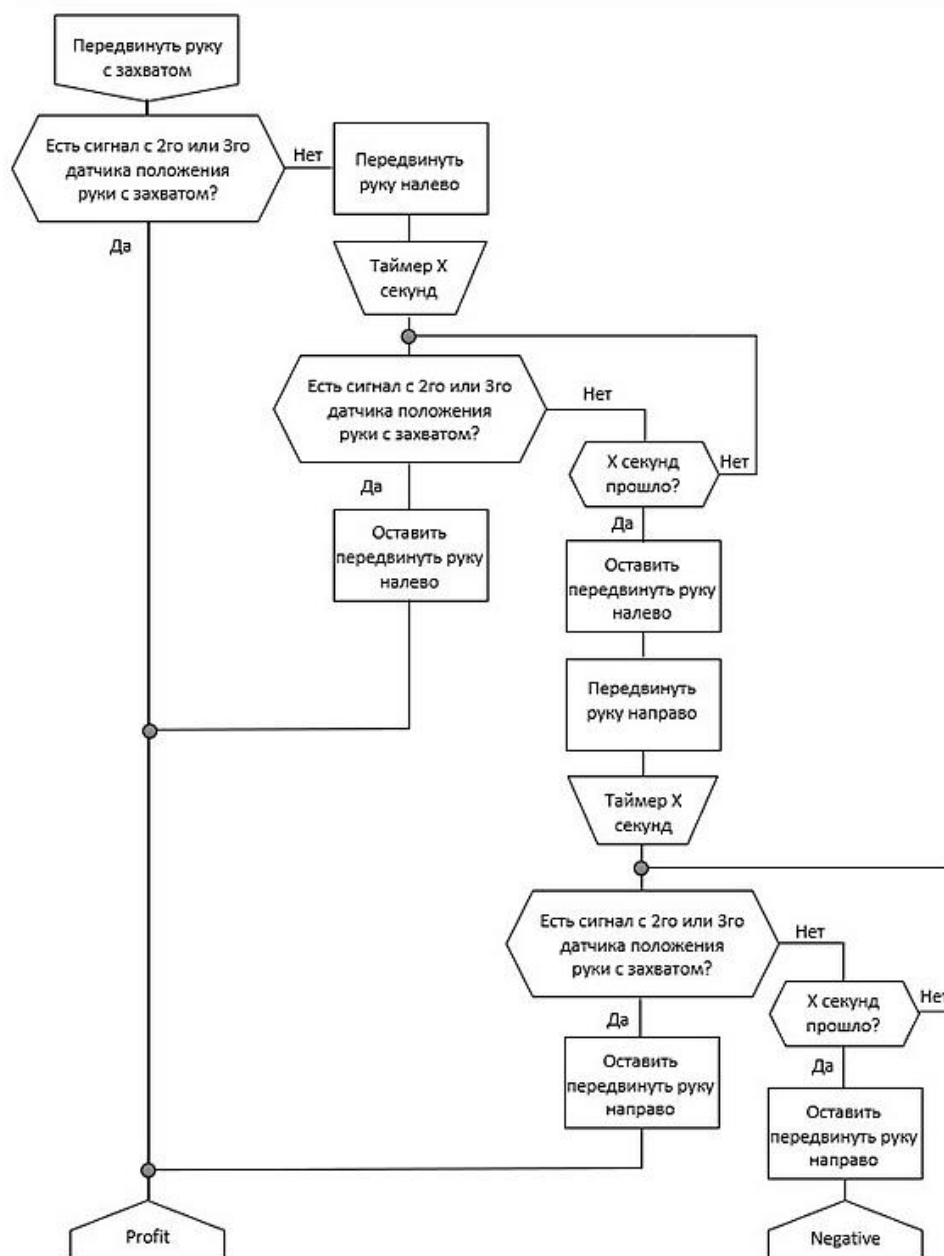
Бұл жұмыста пропорционалды-интегралды-дифференциалды (PID) реттегіштер мен басқару алгоритмдері қарастырылады. Робот қозғалыс траекторияларын жоспарлау үшін, қозғалысы мен бейнелерді айқындауды басқару мен негізгі жұмыс принциптері жылжымалы режим негізінде, авторлардың (H.Cho, L. 2020, Fan, Joo E.M. 2009, Schlanbusch R. 2012) мақалаларда және автор (H.K. Khalil 2002) кітабында бейсызықты жүйені сипаттаған. Автор (B. Siciliano 2009) мақаласында жүйелерді модельдеу және басқару синтезі мәселелері мен робот-манипуляторларының түрлері және олардың қолдану аймақтары сипатталған. Робот-манипулятор динамикасының теңдеулерін қалыптастыру әдістері мен есептеу тұрғысынан тиімді динамика теңдеулері (T.Bräunl 20022, M. Arteaga т.б. 2022, A.Jain 2000) еңбектерінде сипатталған. MATLAB – Simulink кең таралған ортада зерттелетін мәселелерді бағдарламалық қамтамасыз етудің аспектілері (E. Веремей 2004) еңбектерінде қамтылған.

Техникалық көруді пайдалану алгоритмдері суреттерді түсіруден бастап нақты әрекеттерді орындау үшін деректерді талдауға және түсіндіруге дейінгі бірнеше кезеңдерді қамтиды. Бірінші қадам ол, жабдықты таңдау, нысанды орналастыруға арналған негізгі құрылғылар ол – камералар. Мысалы, RGB, стерео камералар, инфрақызыл камералар, ToF камералары және басқа LIDAR типті сенсорлар, ультрадыбыстық сенсорлар. Дәлдікті қамтамасыз ету үшін камералар мен сенсорлардың синхронды әрекет етуі және деректерді бір уақытта түсіруі маңызды.

Келесі қадам мәліметтерді жинау болып табылады. Яғни, камера сканерлейтін объектілер жұмыс кеңістігіне орналастырылады, Содан кейін мәліметтер жиынтығын жасау үшін сипатталады. Техникалық көру кескінді өңдеуді, нысанды анықтауды және кескінді сегменттеуді қамтиды. Кескіндерді өңдеу цифрлық кескіндерді әрі қарай пайдалану мақсатында оларды талдау үшін қажет. Шуды кетіретін, контрастты жақсартатын және контурларды бөлектейтін сүзгілерді пайдалану арқылы кескін сапасы жақсарады.

Келесі кезеңде, нысандарды тану, позиция мен бағдарды анықтау, сегменттеу және тереңдікті бағалау үшін машиналық оқыту алгоритмі қолданылады.

Келесі объектілерді тану үшін терең оқыту алгоритмдері қолданылады, позиция мен бағдарды анықтау, сегменттеу және тереңдікті бағалау. Конвульсиялық нейрондық желілер (CNN) көлемдерді таниды, ал u-net архитектурасы кескіндерді сегменттейді, бұл көру аймағының мазмұнын пикселдер арқылы анықтауға мүмкіндік береді. Әрі қарай, Kalman Filter немесе Optical Flow сияқты бақылау алгоритмдері объектілердің кеңістіктегі қозғалысын бақылайды, 1-сурет «Робот – манипулятор» жұмысының блок-схемасы көрсетілген.



1-сурет. «Робот-Манипулятор» модуль жұмысының блок-схемасы

Ескерту – автормен құрастырылған

Жүйенің күйін сипаттау үшін O_{xy} Қозғалмайтын көлденең тікбұрышты координаттар жүйесін қарастырамыз (2-сурет).

«Робот-Манипулятор» басталуы қозғалмайтын O нүктесімен біріктірілген, оның айналасында бірінші айналмалы қозғалыстар жасалады. Роботтың кез келген уақытта орналасуы үш бұрышпен анықталады: q_1 – Oy вертикалды осінен бірінші ауытқу бұрышы, q_2 – екіншісінің ауытқу бұрышы және q_3 – вектор бағытынан үшінші буынның ауытқу бұрышы. Бұрыштарды санаудың оң бағыты ретінде сағат тіліне қарсы айналу бағыты қабылданады.



2-сурет. «Робот-Манипулятор» бастапқы жағдайы

Ескерту – IT технология кафедрасының зертханасында тәжірибе жасалған

«Робот-Манипулятор» басталуы қозғалмайтын O нүктесімен біріктірілген, оның айналасында бірінші айналмалы қозғалыстар жасалады. Роботтың кез келген уақытта орналасуы үш бұрышпен анықталады: q_1 – O у вертикалды осінен бірінші ауытқу бұрышы, q_2 – екіншісінің ауытқу бұрышы және q_3 – вектор бағытынан үшінші буынның ауытқу бұрышы. Бұрыштарды санаудың оң бағыты ретінде сағат тіліне қарсы айналу бағыты қабылданады.

Басқару ол, буынның айналу моменттерінен тұратын вектор $u = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)^T$. Роботтың физикалық параметрлерінің құрамына келесілер кіреді: m_i буын массасы, олардың ұзындығы L_i , әр буын үшін оның басынан l_i масса центріне дейінгі қашықтық және масса центріне қатынасты буынның инерция моменттері, мұнда $i=1,2,3$. Барлық сандық шамалар СИ жүйесінде келтірілген.

Басқару нысанының математикалық моделі

Бастапқыда келтірілген роботтың барлық параметрлерін жинақтап, келесідей түрде жазамыз:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= J_1 + m_1 l_1^2 + (m_2 + m_3) L_1^2, \\ \alpha_2 &= J_2 + m_2 l_2^2 + m_3 L_2^2 \alpha_3 = (m_2 l_2 + m_3 L_2) L_1, \\ \alpha_4 &= J_3 + m_3 l_3^2, \\ \alpha_5 &= m_3 l_3 L_1, \\ \alpha_6 &= m_3 l_3 L_2.\end{aligned}$$

Көрсетілген шамаларды ескере отырып, басқару объектісі ретінде манипулятор динамикасының моделі екінші типтегі Лагранж теңдеулер жүйесімен сипатталады:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} = u, \quad (1)$$

мұнда $u = (\tau_1, \tau_2, \tau_3)^T$ - айналу моментін басқару векторы, $q = (q_1, q_2, q_3)^T$ – жүйенің бұрыштық координат векторы, $M(q)$ – инерцияның оң анықталған симметриялық

матрицасы, $C(q\dot{q})$ – ортадан тепкіш күш матрицасы. Матрица элементтері $M(q) = \{M_{ij}\}_{i,j=\overline{1,3}}$, $C(q, \dot{q}) = \{C_{ij}\}_{i,j=\overline{1,3}}$ келесідей қатынастардан алынады:

$$\begin{aligned} M_{11} &= \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_4 + 2\alpha_3 \cos q_2 + 2\alpha_5 \cos (q_2 + q_3) + 2\alpha_6 \cos(q_3), \\ M_{1,2} &= \alpha_2 + \alpha_3 \cos q_2 + \alpha_5 \cos(q_2 + q_3) + 2\alpha_6 \cos q_3, \\ M_{21} &= M_{1,2}, \\ M_{13} &= \alpha_4 + \alpha_5(q_2 + q_3) + \alpha_6 \cos q_3, \\ M_{31} &= M_{13}, \\ M_{22} &= \alpha_2 + \alpha_4 + 2\alpha_6 \cos q_3, \\ M_{23} &= \alpha_4 + \alpha_6 \cos q_3, \\ M_{32} &= M_{23}, \\ M_{33} &= \alpha_4; \end{aligned}$$

Горизонталь жүйе қарастырылады, ізінше динамика теңдеуінде (1) гравитациондық күш болмайды. Есептеу нәтижелері кері кинематика жүйесіне беріледі. Оның көмегімен белгілі бір позицияға жету үшін манипулятордың буындарын бұру немесе жылжыту үшін қандай бұрыштар қажет екенін анықтауға болады.

Келесі басқару алгоритмін алу үшін қателік шамасы мен оның туындысын анықтаймыз:

$$e = r - q, \quad \dot{e} = \dot{r} - \dot{q},$$

мұндағы, $r = (r_1, r_2, r_3)^T$ – q векторының қажет траекториясы.

$$u = M\ddot{r} + C\dot{r} + K_\theta \dot{e} + K_p F(e)e, \quad (2)$$

мұнда K_θ, K_p – оң анықталған диагональды матрица, F – диагональды көрініс матрицасы

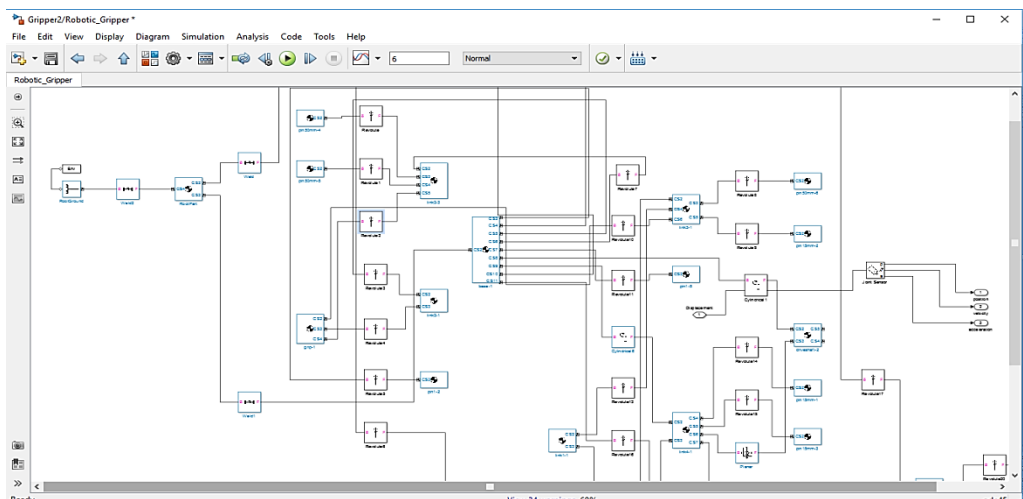
$$\begin{aligned} F(x) &= \text{diag}(f(x_1), f(x_2), f(x_3)), \\ f(x_i) &= \frac{(2\alpha_i + |x_i|)}{(\alpha_i + |x_i|)^2} > 0, \end{aligned} \quad (3)$$

мұнда α_i – оң коэффициенттер, $x = (x_1, x_2, x_3)^T$ – функцияның векторлық аргументі.

Робот манипуляторын басқару алгоритмі PID – реттегіші алынды. PID реттегіштері – бұл берілген шығыстық шама деңгейін бақылап, реттейтін басқару құрылғысы (К. Н. Анг, т.б. 2005). Пропорционалды реттегішке ағымдағы қате тікелей әсер етеді. Ол неғұрлым үлкен болса, басқару сигналы соғұрлым үлкен болады. Осылайша, бұл реттегіш ауытқуларға тез жауап беруге ықпал етеді, бірақ бұл статистикалық қатені тудыруы мүмкін. Интегралды реттегіш баяу және ұзақ ауытқуларды түзету арқылы тұрақты қателік мәселелерін шешуге көмектеседі. Дифференциалды реттегіш жүйені тұрақтылыққа және жылдам түзетулерге төзімділікке әкеледі, болатын қатенің әсерін алдын алып, азайтады (S.Z.S. Al-Khauut 2013).

PID реттегіштері техникалық көру қабілетімен бірге робот манипуляторын басқаруды бірнеше есе жақсартады, бұл дәлірек және икемді іске асыруға мүмкіндік береді. Камералармен суретті түсіріп, өндегеннен кейін визуалды деректерге негізделген қателерді есептеу басталады. Содан кейін манипулятордың немесе объектінің мақсатты нүктеге қатысты орны анықталынып, ағымдағы позиция мен берілген мақсат арасындағы қате есептеледі. Әрі қарай, ол қозғалыстарды реттей отырып, манипулятор жетектеріне беріледі. Роботтың жағдайы туралы ақпарат, техникалық көру үнемі жаңарып отырады. Осылайша, бұл PID реттегіштеріне ағымдағы өзгерістерге жауап беруге мүмкіндік береді (A.S. Goncharov, т.б. 2021, R. Liu, т.б. 2021, M.YU. Serebryakov т.б. 2022).

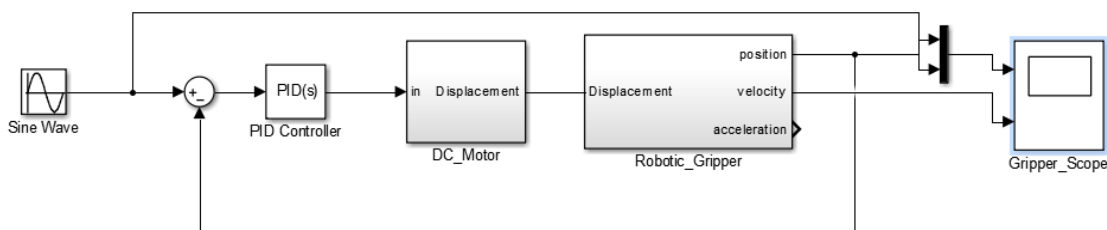
Нәтижелер және оларды талқылау. Бұл бөлімде үш буынды басқару үшін алдыңғы бөлімде сипатталған басқару схемаларын қолдану нәтижелері келтірілген сандық параметрлердің нақты жиынтығы бар робот нәтижелері келтірілген. Барлық қажетті есептеулер мен имитациялық модельдеуді жүргізу Simulink қолданбалы пакетін қолданып, MATLAB ортасында жүзеге асырылады сурет 3. Модельді құру кезінде SimMechanics пакетінің келесідей блоктары қолданылды: Machine Environment, Ground, Revolute, Body, Joint Initial Condition, Joint Actuator, Joint Sensor.



3-сурет. Робот манипуляторының SimMechanics ортасындағы моделі

Ескерту – автормен құрастырылған

Манипулятор моделін құру XYZ координаттар кеңістігінде жүзеге асырылады. Модельді құру кезінде Simulink пакетін пайдаланып жетек реттегіштерін конфигурациялау қажет. Басқарылатын жетектегі типтік түрлендіргіште жылдамдық, ток реттегіштері, ток сенсоры бар. Жылдамдық пен ток реттегіштері құрылымы өзгеретін PID реттегіштері болып табылады және жылдамдық кері байланысы ротордың айналу бұрышы сенсорынан уақыт бірлігіне импульстар санын санау арқылы ұйымдастырылады. Бұл модельге 3 буын және 3 цилиндрлік шарнир кіреді. Бірінші цилиндрлік шарнир Ground блогының көмегімен негізге қосылған.

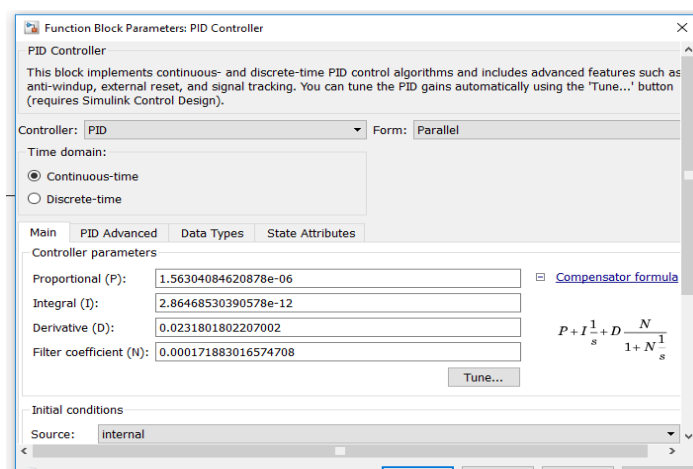


4-сурет. Робот манипуляторының PID реттегішін басқару моделі

Ескерту – автормен құрастырылған

Басқару буынының беріліс функциясы аperiодтық байланыс түрінде болады, ал беріліс коэффициенті мен уақыт константасы контур уақытының минималды константасын қамтамасыз ету шартынан таңдалады (4-сурет). Өтпелі процесті оңтайлы түрге келтіру үшін келесі ережелер қолданылды (5-сурет):

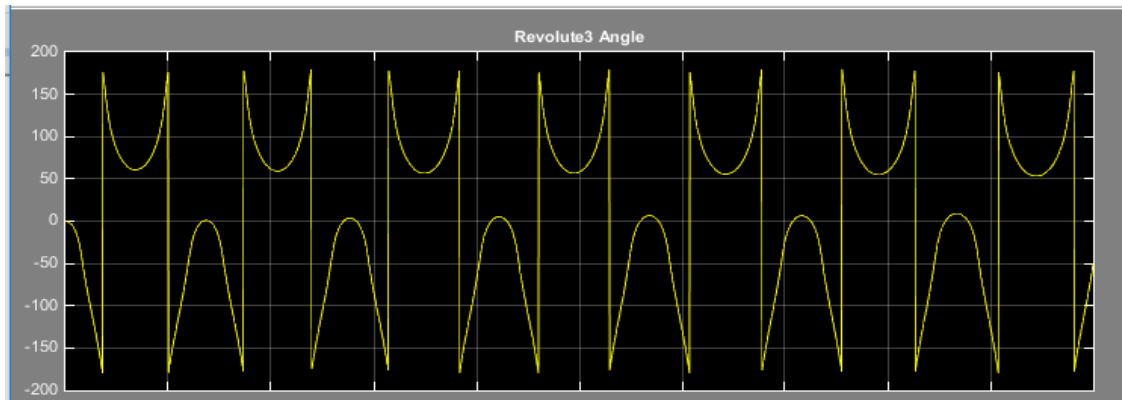
- пропорционалды күшейтуді арттыру өнімділікті арттырады және тұрақтылықты азайтады;
- интегралды реттегіш азайған кезде уақыт өте келе реттеу қатесі тезірек азаяды;
- дифференциалды реттегіштің ұлғаюы тұрақтылық пен өнімділікті арттырады.



5-сурет. PID реттегішін күйге келтіру үшін графликтік интерфейс

Ескерту – автормен құрастырылған

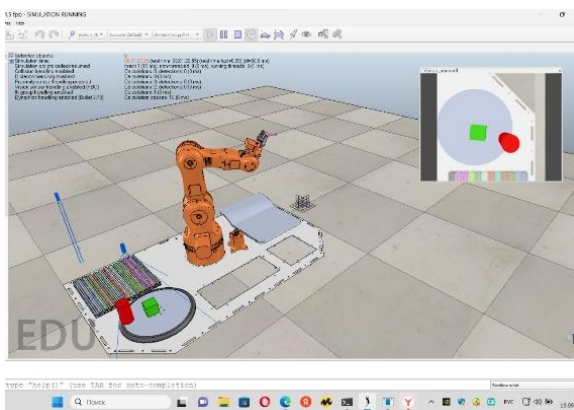
Модельдеу кезінде шынайы қозғалтқыштар мен ток тізбегінің параметрлері қолданылады. Жылдамдық реттегішінің параметрлері function blok Parameters: PID Controller блогының көмегімен жүктеменің орташа мәндері үшін жетек моделіне сәйкес реттелді, ол реттегіштің PID коэффициенттерін берілген өтпелі қисық бойымен түбірлік әдістермен автоматты түрде іздейді.



6-сурет. Робот манипуляторының simmechanics моделінің нәтижелері – түсіру қозғалысы

Ескерту – автормен құрастырылған

Манипулятордың атқарушы кинематикалық тізбегінің моделін құру XYZ оң жақ инерциялық координаттар жүйесінің кеңістігінде жүзеге асырылады. 6-7-суреттерде жоғарыда айтылғандарға сәйкес салынған манипулятордың атқарушы кинематикалық тізбегінің координаталық осінде манипуляторды түсіру жылдамдығының проекциялары келтірілген. Манипуляторды басқару бұрыштық қозғалыс немесе декарттық координаттар арқылы жүзеге асырылуы мүмкін, сонымен қатар техникалық көру модулі бар.



7-сурет. Манипуляторды түсіру күйінің координаттарын өзгерту

Ескерту – автормен құрастырылған

Басқару сапасына реттегіш коэффициенттерінің әсері зор, басқару мақсаты қандай, қажетті қандай траекториялар алынды, және жүйеге қандай да бір кедергілердің әсерінің бар екендігін білу үшін компьютерлік модельдеуді қажет етеді. Бұл бөлімде қажетті траекторияны бере отырып, өтпелі процесс уақыты мен қайта реттеуді минимизацияладық

Қорытынды. Ұсынылып отырған мақалада робот-манипуляторларға қолданылатын заманауи басқару әдістеріне қысқаша шолу берілді. Зерттеу барысында екі тәсіл зерттелді: бұрыштық қозғалысты басқару және декарттық координаттар жүйесі. Манипулятор айналу осьтеріне қатысты буындардың айналу бұрыштарын өзгертетін бұрыштық қозғалыс біздің жағдайда ыңғайлы болды, өйткені ол шектеулі кеңістіктерде күрделі тапсырмаларды орындау кезінде көбірек еркіндік береді. Белгілі бір түсіру көлбеуі қажет тапсырмаларда бұрыштарды басқару жақсы бақылауды қамтамасыз етеді және түрлендірулерге қатысты қателіктерді жібермейді.

Сонымен қатар, техникалық көру мен машиналық оқытуды біріктіру позициялау дәлдігін арттыратыны анықталды. CNN-дің камералардан деректерді талдаудағы тиімді жұмысының арқасында объектілердің бағытын дәл анықтауға болады. Осылайша, бұл PID реттегіштерін басқару және кері кинематика алгоритмдерінің жұмысын жақсартады.

Тексеру үшін Optima 2 бағдарламалық жасақтамасында, Simulink қолданбалы пакетін қолданып, MATLAB ортасында және V-REP симуляциялық платформасында эксперименттер жүргізілді. Бұл виртуалды эксперименттер бұрыштық қозғалысты да, декарттық координаттарды да басқарудың тиімділігін растады. Модельдеу нәтижелері нақты манипуляторда сәтті шығарылды.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдеді.

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

Әдебиеттер тізімі

- G. Balbayev, A. Mussina, A. Zhauyt, B. Shingissov, M. Kalekeyeva. Neural Control for Image Stabilisation Using a Reference Model. // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2021. – vol. 10 № 1. – P. 17-21.
- Yang-Jie Cao, Li-Li Jia, Yong-Xia Chen, Nan Lin, Cong Yang, Bo Zhang, Zhi Liu, Xue-Xiang Li, Hong-Hua Dai. Recent Advances of Generative Adversarial Networks in Computer Vision // IEEE Access. – 2019. – Vol. № 7. – P. 14985-15006.

- П.М. Рахметова, Ж.Н. Исабеков, А.Ю. Бектилегов. Исследование системы управления движением манипулятора с помощью компьютерного зрения // Вестник КазАТК. – 2023. – № 6 (129). – С. 319-326 // P.M. Rahmetova, Zh.N. Isabekov, A.YU. Bektilevov. Issledovanie sistemy upravleniya dvizheniem manipulyatora s pomoshch'yu komp'yuternogo zreniya // Vestnik KazATK. – 2023. – № 6 (129). – S. 319-326.
- Колтыгин Д.С., Седельников И.А., Петухов Н.В. Аналитический и численный методы решения обратной задачи кинематики для робота Delta // Вестн. Иркутского гос.технического ун-та. – 2017. – Т. 21. № 5 (124). – С. 87-95 // Koltygin D.S., Sedel'nikov I.A., Petuhov N.V. Analiticheskij i chislennyj metody resheniya obratnoj zadachi kinematiki dlya robota Delta // Vestn. Irkutskogo gos.tekhnicheskogo un-ta. – 2017. – Т. 21. – № 5 (124). – S. 87-95
- Cho H. On Robust Adaptive PD Control of Robot Manipulators. Journal of Applied and Computational Mechanics. 2020; 6:1450-1466. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.22055/JACM.2020.35658.2707>
- Fan L., Joo E.M. Linear and nonlinear PD-type control of robotic manipulators for trajectory tracking. 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE Press; 2009. – P. 3442-3447. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2009.5138846>
- Schlanbusch R., et al. PD+ based output feedback attitude control of rigid bodies. IEEE Transactions on Automatic Control. 2012; 57(8):2146-2152. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/TAC.2012.2183189>
- Santibañez V., Kelly R. PD control with feedforward compensation for robot manipulators: analysis and experimentation. Robotica. 2001; 19(1):11-19. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574700002848>
- Piltan F., Sulaiman N.B. Review of sliding mode control of robotic manipulator. World Applied Sciences Journal. 2012; 18(12):1855-1869. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2012.18.12.208>
- Corradini M.L., et al. Discrete time sliding mode control of robotic manipulators: Development and experimental validation. Control Engineering Practice. 2012; 20(8):816-822. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.04.005>
- Sotnikova M.V., Veremey E.I., Korovkin M.V. Transoceanic routes optimization using dynamic properties of ship and weather conditions. 2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (dedicated to the memory of V.F. Demyanov) (CNSA). IEEE Press, St. Petersburg, Russia; 2017. – P. 1-4. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1109/CNSA.2017.7974017>
- [Khalil H.K. Nonlinear systems third edition. Patience-Hall, Inc.; 2002. 3rd ed. 768 p. (In Eng.)
- Siciliano B., et al. Robotics: Modelling, Planning and Control. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer Science & Business Media, London; 2009. – 632 p. (In Eng.) doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-642-1>
- Bräunl T. Robot Manipulators. In: Embedded Robotics. Springer, Singapore; 2022. – P. 253-269. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-981-16-0804-9_13
- Arteaga M.A., Gutiérrez-Giles A., Pliego-Jiménez J. Dynamics of Rigid Robot Manipulators. Local Stability and Ultimate Boundedness in the Control of Robot Manipulators. Springer, Cham; 2022. – P. 71-102. (In Eng.) doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85980-0_3

Information about authors

Kozhakhmetova Dinara – Associate Professor of the Department of IT Technologies, Doctor of Philosophy PhD, Shakarim University of Semey, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: dinara_kozhahmet@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4327-3899>, +7775 433 44 95

Samal Kaliyeva – PhD, Associate Professor of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, L.N.Gumilov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: s.kaliyeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4561-8045>, +7 777 235 6190

Mukhamedrakhimova Galiya – Candidate of Pedagogical Sciences of the Department of Radio Engineering, Electronics and Telecommunications, L.N.Gumilov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan; e-mail: isatai-07@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9951-6263>, +7 708 425 5446

Karymsakova Indira – Associate Professor of the Department of IT Technologies, Doctor of Philosophy PhD, Shakarim University of Semey, Semey, Republic of Kazakhstan; e-mail: indviki@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1496-3188>, +7 702 803 2029

Alibekkyzy Karlygash – Philosophy PhD, Associate Professor of the SDTeAI, D.Serikbaev EKSTU, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan; e-mail: karlygash.alibekkyzy@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6732-4363>, +707 646 52 11

ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ
ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
ARTIFICIAL INTELLIGENCE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_187
IRSTI 28.23.17

M. Nurtay¹, A. Akhmetov², A. Tau³, G. Alina⁴, N. Mutovina⁵

Abylkas Saginov Karagandy Technical University, Karagandy, Kazakhstan

¹E-mail: solano.lifan2@bk.ru*

²E-mail: furybam@gmail.com

³E-mail: ardak.tau@mail.ru

⁴E-mail: alinagaukhar@gmail.com

⁵E-mail: mutovina_natalya@mail.ru

APPLICATION OF REINFORCEMENT LEARNING TO DEVELOP AN AI MODEL FOR GAME “TOGYZ QUMALAQ”

«ТОҒЫЗ ҚҰМАЛАҚ» ОЙЫНЫНА АРНАЛҒАН ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ МОДЕЛІН
ӘЗІРЛЕУ КЕЗІНДЕ НЫҒАЙТЫП ОҚЫТУДЫ ҚОЛДАНУ

ПРИМЕНЕНИЕ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
МОДЕЛИ ИИ ДЛЯ ИГРЫ «ТОГЫЗ КУМАЛАК»

Abstract. Logical games often require players to solve various puzzles and strategic challenges. Thanks to the active implementation of Artificial Intelligence, it has become possible to use Deep Learning models in such games, which has led to a significant breakthrough in solving other related tasks in the field. This paper presents a study on the development and training of two Reinforcement Learning algorithms, Q-learning and Deep Q-Network (DQN) for playing the game Togyz qumalag. Both models were trained and evaluated in a game against MiniMax, which was also implemented by the authors of this research. The experiments were conducted with MiniMax recursion depths of 2, 3, and 4, respectively. The article presents the training parameters of models based on Q-learning and DQN, which achieved the best results. For each of the models, reward and training episode graphs are provided. The paper also includes the architecture of DQN, which demonstrated promising results. The results show that DQN has achieved significant success in solving this task, demonstrating notable performance. A comparative analysis also revealed that, unlike DQN, Q-learning requires more significant computational and memory resources for training.

Keywords: Togyz qumalag, Reinforcement Learning, Q-learning, Deep Q-Network (DQN), MiniMax, Algorithms, Game AI, Agent performance.

Аңдатпа. Логикалық ойындар көбінесе ойыншылардан әртүрлі басқатырғыштар (головоломки) мен стратегиялық міндеттерді шешуді талап етеді. Мұндай ойындарда жасанды интеллектті белсенді енгізу арқылы терең оқыту модельдерін қолдану мүмкіндігі пайда болды, бұл осы саладағы басқа да байланысты мәселелерді шешуде айтарлықтай жетістіктерге өкелді. Бұл мақалада тоғыз құмалақ ойынына арналған екі күшейтілген оқыту алгоритмін: Q-learning және Deep Q-Network (DQN) әзірлеу және оқыту бойынша зерттеу ұсынылған. Екі модель де MiniMax-қа қарсы ойында оқытылды және бағаланды, оны да осы зерттеудің авторлары жүзеге асырды. Эксперименттер сәйкесінше MiniMax 2, 3 және 4 рекурсия тереңдігімен жүргізілді. Мақалада ең жақсы нәтижелерге қол жеткізген Q-learning және DQN негізіндегі модельдерді оқыту параметрлері берілген. Модельдердің әрқайсысы үшін марапаттау кестелері мен оқу эпизодтары келтірілген. Құжат сонымен қатар перспективалы нәтижелер көрсеткен DQN архитектурасын қамтиды. Нәтижелер DQN бұл мәселені шешуде айтарлықтай жетістіктерге жеткенін және елеулі өнімділікті көрсеткенін білдіреді. Сонымен қатар, салыстырмалы талдау Q-оқытудың DQN-нен айырмашылығы, оқыту үшін едәуір есептеу ресурстары мен жад ресурстарын қажет ететіндігін көрсетті.

Түйін сөздер: Тоғыз құмалақ, күшейтілген оқыту, Q-оқыту, терең Q-желі (DQN), минимакс, алгоритмдер, ойын AI, агент өнімділігі.

Аннотация. Логические игры часто требуют от игроков решения различных головоломок и стратегических задач. Благодаря активному внедрению искусственного интеллекта в таких играх появилась возможность использовать модели глубокого обучения, что привело к значительному прорыву в решении других смежных задач в этой области. В этой статье представлено исследование по разработке и обучению двух алгоритмов обучения с подкреплением: Q-learning и Deep Q-Network (DQN) для игры Тогыз кумалак. Обе модели были обучены и оценены в игре против MiniMax, которую также реализовали авторы данного исследования. Эксперименты проводились с глубиной рекурсии MiniMax 2, 3 и 4 соответственно. В статье представлены параметры обучения моделей на основе Q-learning и DQN, которые достигли наилучших результатов. Для каждой из моделей представлены графики вознаграждений и эпизодов обучения. В документ также включена архитектура DQN, которая продемонстрировала многообещающие результаты. Результаты показывают, что DQN добилась значительных успехов в решении этой задачи, продемонстрировав заметную производительность. Сравнительный анализ также показал, что, в отличие от DQN, Q-обучение требует для обучения более значительных вычислительных ресурсов и ресурсов памяти.

Ключевые слова: Тогыз кумалак, обучение с подкреплением, Q-обучение, Глубокая Q-сеть (DQN), минимакс, алгоритмы, игровой ИИ, производительность агента.

Introduction. Artificial intelligence (AI) and Machine Learning (ML) are among the most promising and rapidly evolving fields in technology today. Moreover, the field of reinforcement learning (RL) is garnering increasing attention and finding broad applications across various domains. One of the intriguing tasks in which RL demonstrates its power is the creation and training of artificial intelligences capable of competing in traditional and culturally significant national games.

The evolution of Reinforcement Learning (RL) in the context of games such as Go, chess, checkers and strategy games is a fascinating and important part of Artificial Intelligence. First of all, this study will introduce into the history and point out the key points, including the application of RL to the AlphaGo and AlphaZero models.

The first steps in the development of game algorithms in the 1950s and 60s were the Machine "Shannon's Type B" (Zhumanov A. et al, 2021) and the computer program "Samuel's Checkers Player" for checkers.

In the 1990s and 2000s, computer programs for chess (Deep Thought (Turgumbaev T. et al., 2019) Deep Blue became stronger due to the use of traditional methods such as MiniMax and alpha-beta clipping.

AlphaGo developed by DeepMind, became the first significant step in applying RL to Go, one of the most complex strategic games.

AlphaGo stunned the world in 2016 by defeating Go world champion Li Sedol. The model uses a combination of Deep Neural Networks and Reinforcement Learning methods to improve a game.

After the success of AlphaGo in 2017, DeepMind released a version of AlphaGo Zero, which was trained from scratch using only the most basic information about the rules of the game and self-playing metrics, and achieved even more impressive results (Vasiliev A. et al., 2020).

In 2017, DeepMind advanced its research with the creation of the AlphaZero (Vasiliev A. et al, 2020) model, capable of learning not only Go, but also chess and checkers with amazing performance.

AlphaZero was trained using a single common architecture for different games and without any prior information about the rules of the game. This model surpassed the best chess and checkers programs and even improved AlphaGo's results (Vasiliev A. et al., 2020).

Reinforcement Learning in the context of games has become a medium for demonstrating the application of RL to complex strategic planning and learning problems.

Thus, AlphaGo and AlphaZero have shown that RL with Deep Learning can learn strategies that surpass human abilities in games. These technologies have also found practical application in decision optimization and robotics.

Advances in gaming have shown the potential of RL to solve a wider range of tasks, such as automatic parameter tuning, robot control, and autonomous systems.

Traditional board games such as Togyz qumalaq, Mankala and Kalah can be improved and diversified using Artificial Intelligence (Dalieva, A. et al., 2021).

Mancala is a traditional African game where players move and collect stones in holes on a game board. The goal is to collect more stones than the opponent.

The board game Kalah (Pekař L. et al., 2020) is popular in different regions of Africa and on the Arabian peninsula. Players collect and move stones in an effort to score more points and capture the opponent's stones.

Togyz qumalaq is a strategy game popular in Central Asia where players move stones between holes on the game board in an effort to grab more stones from the opponent (Dalieva, A. et al., 2021). The main goal of the game is to accumulate more stones.

Here is a general description of these games and how AI can make changes to them:

- AI can be used to develop optimal strategies in games. It can analyze the current state of the game and suggest the best moves for the players.

- AI can serve to train beginners in the game by providing recommendations and explaining the rules.

- AI can serve to create more intelligent virtual rivals. These bots can adapt their strategies to each player's style of play.

- AI can create a variety of game scenarios and complicate tasks for players, enriching the gaming experience.

- These games have their own unique rules and traditions in different cultures. AI can help players from different parts of the world understand and enjoy these games by providing multilingual translation and context.

It is possible to improve and enrich traditional board games, making them more interesting and accessible to a diverse audience using Artificial Intelligence.

Togyz qumalaq is a traditional board game widely popular among the peoples of Central Asia, including Kazakhstan. It is characterized by intricate rules, strategic decision-making, and a rich history, making it an excellent subject for research in the field of machine learning. This article examines how RL agents can be trained to play "Togyz qumalaq" and how this can contribute to the preservation and promotion of this culturally significant national game (Zhumanov A., et al., 2021).

Literature review. The research (Shakya A. et al., 2023) is dedicated to the latest advancements in the field of reinforcement learning (RL) and contemporary gaming applications. By analyzing the literature on deep learning (DL) and reinforcement learning, as well as the extent to which scientific research is based on games such as ATARI, chess, and Go, the authors have established a unified framework and trends for the present and future of this industry (RL in gaming). Through their research, the authors conclude that deep RL constitutes approximately 25.1% of the DL literature, with a significant portion of this literature focused on RL applications in the gaming industry, paving the way for new and more complex algorithms capable of surpassing human performance.

In article (Wu K. et al., 2023), the application of the DQN algorithm for training a neural network to play the games Pong and Ms. Pac-Man is explored. The obtained data demonstrates a high level of performance of DQN in the simple Atari Pong game, but it encounters challenges when learning the more complex game Ms. Pac-Man. The authors attribute this lower performance to time and computational resource limitations.

Additionally, the authors conclude that with sufficient training time and exploration, the model will eventually converge once the optimal combination of hyperparameters is determined.

In reference (Pekař L. et al., 2020), the history of the game Kalah is examined, along with research evaluating efficient tree search solutions. The authors propose the development of computationally simpler gaming algorithms and strategies. The article introduces an original heuristic algorithm based on the analysis of game rules, as well as standard and modified mini-max tree search algorithms. Experiments using a simple C++ application with the Qt framework revealed that the proposed heuristic algorithm performs comparably to an average-experience player and can outperform tree search algorithms with depths up to 2 nodes. The heuristic algorithm involves the use of self-learning strategies during gameplay to achieve better performance.

Article (Vasiliev A., et al., 2020) provides a review of the field of Reinforcement Learning (RL), including key algorithms and applications. It examines fundamental RL algorithms and Deep Reinforcement Learning (DRL) methods for solving complex problems with continuous actions and state spaces. Special attention is given to the applicability of RL in various interdisciplinary domains. The article also discusses model-based approaches and multi-agent RL. In conclusion, it emphasizes the prospects for future research in the field of RL.

In work (Buchanan B. G., 2021), the authors introduce a novel approach to playing the game of Go, utilizing deep neural networks to evaluate board positions and make moves. These networks are trained using a combination of supervised learning with expert data and reinforcement learning. Without prior search, they achieve the level of modern Monte Carlo tree search programs and introduce a new search algorithm that combines Monte Carlo simulations with value and policy networks. Using this algorithm, the AlphaGo program defeats other Go programs and secures a 5:0 victory over the European Go champion, marking the first time a computer program has defeated a professional human player in a full-sized game of Go, previously considered unattainable until a decade ago.

The work (Diddigi R., et al., 2022) presents the AlphaGo program, which demonstrated the level of artificial intelligence capable of competing and winning in one of the most complex strategic games - Go. AlphaGo was part of a research project that allowed DeepMind to conduct research in the areas of boosted learning and reinforcement learning, which has significant implications for the development of artificial intelligence and other fields. AlphaGo's success isn't just limited to games; Technologies developed for AlphaGo can be applied in various fields, including medicine, business and scientific research. AlphaGo has achieved many milestones in the development of artificial intelligence, including beating professional Go players and developing new learning methods. These advantages helped establish AlphaGo as a major advance in artificial intelligence and stimulate further research and development in the field.

The research (Shevtekar M., et al., 2022) presents the main advantages of the generalized MiniMax Q-learning algorithm for stochastic games, which can solve complex zero-sum games where determining optimal strategies can be challenging, including economic simulations and strategic scenarios. The considered algorithm is able to adapt to changing conditions and strategies of other players, which makes it useful in environments with dynamic variables, and can also be used for research and development of new methods in the field of artificial intelligence and reinforcement learning.

The article (Zhu, W., et al., 2019) discusses the MiniMax method for which the AlphaBeta Pruning pruning method is used. AlphaBeta Pruning is an optimization technique for tree search algorithms such as game trees. The basic idea of this technique is that when certain

conditions are detected, certain subtrees can be excluded from further analysis, resulting in a significant reduction in the computational load. In the case of MiniMax, this allows you to exclude nodes of the game tree where the probability of finding a more profitable move is low. This reduces the number of calculations and allows you to evaluate prospects in the game more efficiently.

The authors' use in article (Zhou, X., et al., 2017) of the DQN (Deep Q-Network) algorithm and its theoretical analysis can be used in the field of artificial intelligence and reinforcement learning in gaming applications and the development and improvement of artificial intelligence for games, including classic video games and board games, in robotics, algorithms are used to train robots to make decisions and control in various environments, to control systems and processes in the field of autonomous cars DQN can help develop control and decision-making systems. Deep learning algorithms, including DQN, are used to analyze medical data and diagnose various diseases.

In (Ms.S.Manju, et al., 2011) improved strategies for the classical Q-learning algorithm using various reward methods are considered. In the relative method, immediate rewards are selected. This allows the agent to respond more quickly to positive rewards, reducing the number of iterations before obtaining positive results. The continuous action method uses discounted rewards. This allows the long-term consequences of an agent's actions to be taken into account, helping the agent make more informed decisions. The Hyper-Q method uses mixed strategies with cumulative rewards. This allows the agent to adapt to different scenarios and choose the best actions in different situations. These advanced strategies enable agents to learn faster and more efficiently, reducing the number of iterations and improving the ability to adapt to a variety of scenarios.

The AIM and objectives of the study. The aim of the research is to develop and train a model using Reinforcement Learning methods that can play the traditional Kazakh game "Togyz qumalaq".

To achieve this aim, the following objectives are accomplished:

Model architecture selection: choose and configure a Reinforcement Learning model architecture capable of adapting to the complex rules and strategies of the game "Togyz qumalaq"

RL agent training: train an RL agent based on collected data with the goal of enabling it to play "Togyz qumalaq" competitively.

Results evaluation: evaluate the performance of the fitted agent by comparing its gameplay to that of a programmed algorithm and assessing the effectiveness of its strategy.

Materials and methods. In the development of any RL model, it is necessary to gather data in order to describe the state of the environment and identify key factors.

Game state representation: the game "Togyz qumalaq" consists of a game board with 18 cells, each initially containing 9 stones and a variable number of stones as the game progresses. Each player has 9 cells at their disposal. The game state is represented as an array of 18 elements, where each element denotes the number of stones in a cell. The objective of each player is to collect the maximum number of stones by the end of the game. However, if a player runs out of cells to make a move, the game is also considered in favor of the opponent. There can be a draw when players accumulate an equal number of stones at the end of the game. A player removes all stones from one of the pits on their side. If the selected pit contained more than one stone, the first removed stone is placed back into the same pit from which it was taken. All subsequent removed stones are distributed counterclockwise (from left to right in their own pits and from right to left in the opponent's pits). One stone is placed in each pit.

If the selected pit contained only one stone, it is placed in the next pit counterclockwise.

If, while distributing the stones, a player places the last stone into an opponent's pit, thereby making the total number of stones in that pit even, they capture all the stones from that pit (including their own) and place them in their own storage pit.

If, during the stone distribution, a player places the last stone in an opponent's pit, bringing the total number of stones in that pit to three, and if the following three conditions are met, then all three of those stones are moved to the player's "qazan" (a special collecting pit), and the pit is transformed into a "tuzdyq" (a "sacred place" in Kazakh). The three conditions are as follows:

- if the player already has a "tuzdyq";
- the last pit on the opponent's side (9th hole) cannot be turned into a "tuzdyq";
- a "tuzdyq" cannot be created symmetrically to an opponent's already created "tuzdyq" (for example, if the third pit on the player's side is an opponent's "tuzdyq," the player cannot transform the third pit on the opponent's side into their own "tuzdyq").

A move that violates any of these three conditions can be made, but it does not result in the creation of a "tuzdyq" and the three stones remain in the pit. Any stone that falls into a "tuzdyq" during distribution is taken by the owner of the "tuzdyq" and placed in their "qazan". If a player cannot make a move because all of their pits are empty, the second player transfers all the remaining stones in their pits to their "qazan" and the game ends. The player with the most stones in their "qazan" wins.

At the time of conducting the research, the authors did not have access to any historical data regarding games with optimal moves. However, they found a solution by creating agents in the form of random move generation and by using the classic recursive MiniMax algorithm. The MiniMax algorithm is presented in the listing below:

Algorithm 1 MiniMax class implementation

```
class MiniMax:
    function get_move(board, depth)
    parameters:
        • instance of class Board
        • depth of recursion
    returns:
        • move
    begin function
        best_move = null
        best_eval = -inf
        best_moves = []
        possible_moves = board.get_possible_moves()

        foreach move in possible_moves
            board.make_move(move)
            eval = MiniMax(board, depth, -inf, +inf, false)
            board.undo_move()

            if eval is greater than best_eval
                best_eval = eval
                best_moves = [move]
            else if abs(eval - best_eval) is less or equal 0.01
```



```
        best_moves.add(move)
    endif
end for

    move = random move from best_moves
    return move
end function

function MiniMax(board, depth, alpha, beta, is_maximizing)
parameters:
    • instance of class Board
    • depth of recursion
    • alpha, beta
    • is_maximizing (boolean)
returns:
    • eval
begin function
    eval = 0
    possible_moves = board.get_possible_moves()

    if depth is equal 0 or board.check_winner() is not null
        eval = board.evaluate()
        return eval
    end if

    if is_maximizing
        max_eval = -inf
        foreach move in possible_moves
            board.make_move(move)
            eval = MiniMax(board, depth - 1, alpha, beta, false)
            board.undo_move()
            max_eval = max(max_eval, eval)
            alpha = max(alpha, eval)

            if beta is less or equal alpha
                break
            end if
        end for
        return max_eval
    else
        min_eval = +inf
        foreach move in possible_moves
            board.make_move(move)
            eval = MiniMax(board, depth - 1, alpha, beta, true)
            board.undo_move()
            min_eval = min(min_eval, eval)
        end for
        return min_eval
    end if
end function
```

```

        beta = min(beta, eval)
        if beta is less or equal alpha
            break
        end if
    end for
    return min_eval
end if
end function
end class

```

The code for the MiniMax algorithm is interpreted as follows: the MiniMax class has a method `get_move()` which takes the current board state as an array and the depth of recursion as input. This method returns the optimal cell number from which the computer should make its move. The `MiniMax(board, depth, alpha, beta, is_maximizing)` function is the recursive core of the MiniMax algorithm. It calculates the evaluation score for the current board state. The `is_maximizing` flag indicates whether the computer is maximizing its score at the current recursion level.

As the first RL model, Q – learning was adopted. The Q – function formula (1) for the model looks as follows:

$$Q(s, a) = Q(s, a) + \alpha \times [R + \gamma \times \max(Q(s', a')) - Q(s, a)] \quad (1)$$

where $Q(s, a)$ represents the Q – value for a state-action pair (s, a) , α (alpha) is the learning rate, controlling how much the Q – values are updated in each learning step, R is the immediate reward received after taking action 'a' in state 's', γ is the discount factor, which balances the importance of immediate rewards versus future rewards, $\max(Q(s', a'))$ represents the maximum Q – value for the next state 's' among all possible actions 'a'.

The parameters of the Q – learning model were as follows:

Learning rate – 0.0001

Discount factor – 0.90

Epsilon – 0.5

The next implementation of the RL model was Deep Q Network (DQN). The DQN model was based on fully connected Dense layers with the following architecture:

The input layer has a size of 18 neurons (board), it is connected to the first Dense layer with 64 neurons (dense), after which the state of 2 players (tuzdyq) is supplied in parallel. These two parallel layers then pass through Dense layers of 64 and 32 neurons respectively, then concatenate layer into a layer of 96 neurons. In parallel there is a layer (move_owner) with 1 neuron, which serves to supply the model with information about the order of moves. This layer passes through Dense into 16 neurons and is concatenated into (concatenate_1). Next, 1 layer of Dense for 128, two layers for 64 neurons and one layer for 9 neurons are added on top. After this, it is necessary to take into account information about possible moves, which allows this to be done by a parallel input layer (possible_moves). The activation of the last layer occurs according to softmax, where the maximum element of the vector shows the most probable number of the cell from which a move must be made.

Adam was used as an optimizer with a learning rate of $1e-6$, and the loss function was Categorical Crossentropy. The discount factor was taken as 0.95. Batch size was 32.

The structure of the DQN algorithm is shown in Figure 1.

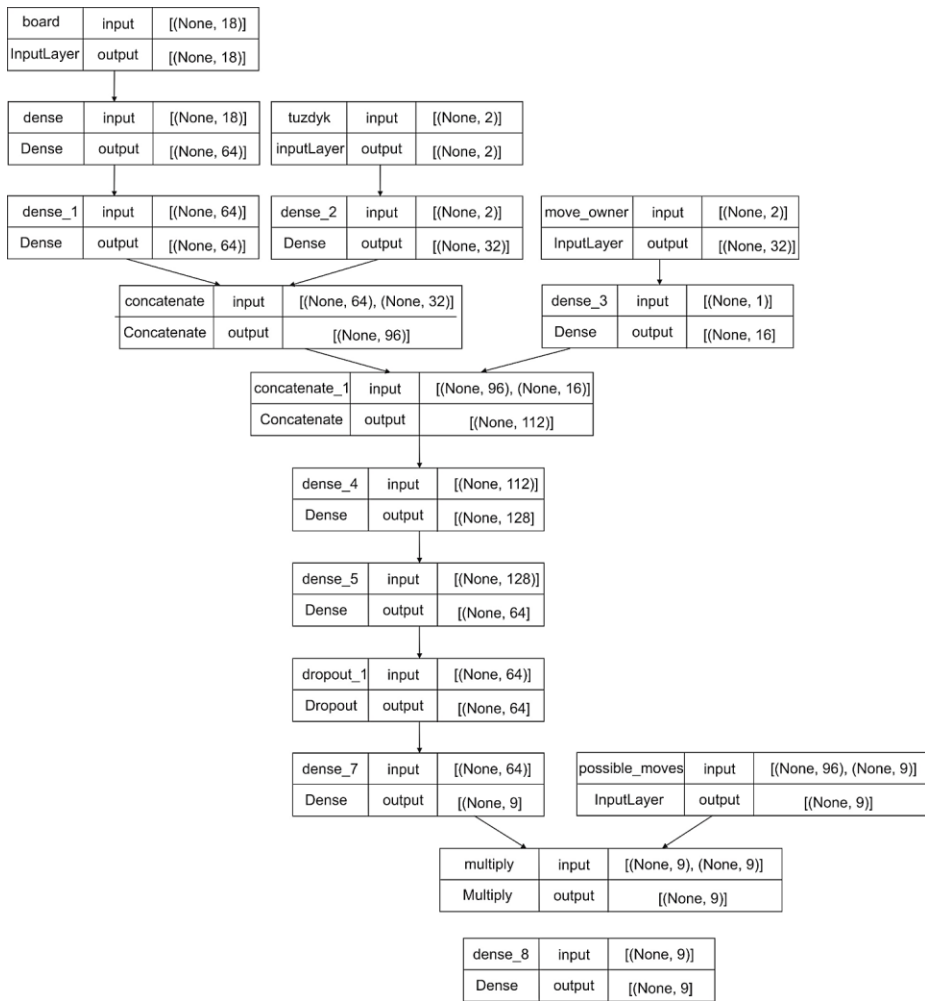


Figure 1. The structure of DQN model

Note – compiled by the author or compiled by the authors on the basis of (Nurtay M., 2022)

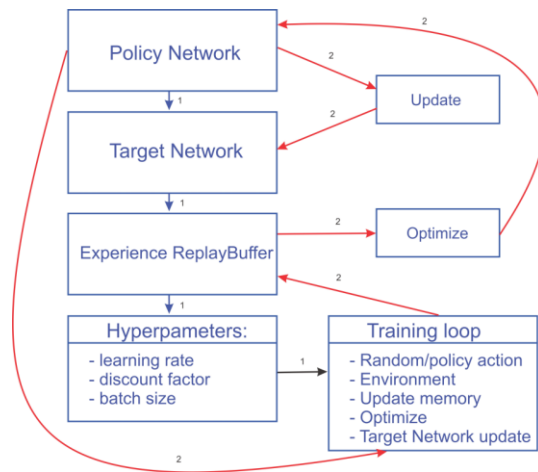


Figure 2. DQN algorithm's pipeline

Note – compiled by the author or compiled by the authors on the basis of (Nurtay M., 2022)

The Policy Network takes the state of the environment as input and predicts Q-values (expected future rewards) for all possible actions. Policy Network learns to predict optimal actions in different environmental states.

Target Network is a second neural network that also predicts Q-values, but it is used during the training process to stabilize the update of Q-values. During training, the Target Network is updated slower than the Policy Network and is used to calculate target Q-values.

The Experience Replay Buffer stores previous states, actions, rewards, and next states collected as the agent interacts with the environment. It is used to randomly sample learning experiences, which helps improve learning stability.

Training Loop is the core of the DQN algorithm, in which the agent interacts with the environment, collects experience and updates the Policy Network and Target Network. The training cycle includes sampling mini-batches from the experience buffer, calculating losses, and updating the network weights.

Hyperparameters are parameters that determine the agent's behavior and the learning process, such as the learning rate, discount factor, batch size and others. Hyperparameters must be tuned experimentally to achieve better results.

Results. This section presents the results of a study aimed at applying reinforcement learning methods to the development of an intellectual model for the game "Togyz Kumalak". The study results reflect the performance and adaptability of models developed using reinforcement learning and compare them with classical methods such as MiniMax. This section also provides an analysis of the key results, an assessment of the strengths and limitations of our approach, an examination of the key points, and a conclusion about their impact on the results.

A. Results of Q-learning performance. The Q-learning model was trained on 700 game episodes and showed the best result for a game with a MiniMax recursion depth of 1. For other options of recursion depth, the results were significantly lower. It should be noted that the algorithm was subject to restrictions on memory consumption; accordingly, it was necessary that the algorithm could learn as quickly as possible at lower costs for storing various states of the Q-table. However, even with all game variants, memory overflow was reached after the 700th episode of the game. The learning outcomes using the Q-learning model are shown in Figure 3.

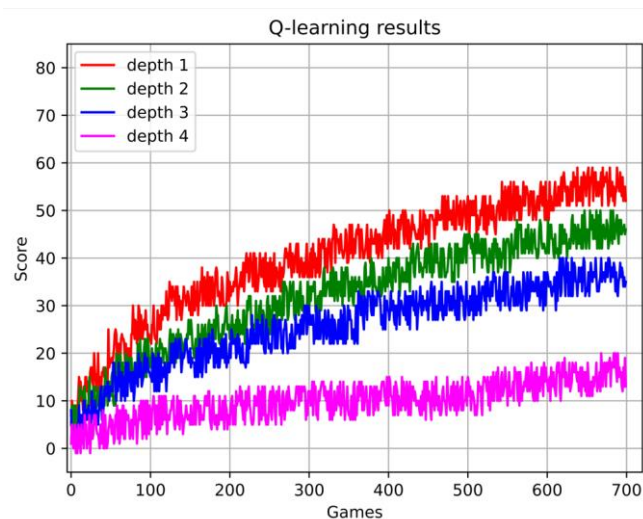


Figure 3. Q-learning score for MiniMax depths 2, 3, and 4

Note – compiled by the author personally (Akhmetov A.)

The graph above demonstrates that the 81 stone indicator is not achieved in any games, however, these are games that mostly ended either in a draw or in favor of the Q-learning model, when MiniMax had no possible moves left. With each increase in the recursion depth of the Q-learning model, it became more difficult to win MiniMax, which is also illustrated by the results.

B. Results of DQN model performance. On the contrary, the DQN model showed better results and over a significantly larger number of games played. The result of DQN training is shown in Figure 4.

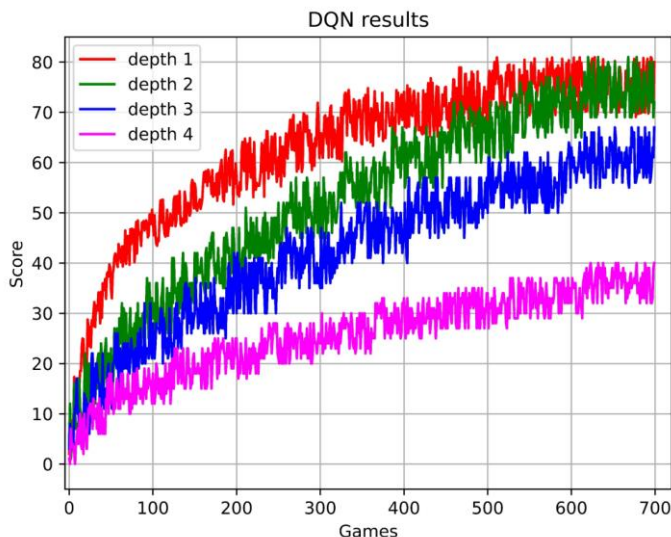


Figure 4. DQN score for MiniMax depths 1, 2, 3, and 4

Note – compiled by the author personally (Akhmetov A.)

Discussion of experimental results. In this section, we analyze the results of our experiments, particularly focusing on the "Games vs Score" graph for the Togyz qumalaq game at different depths of the MiniMax search (1, 2, 3, and 4) in comparison to the performance of DQN and Q-learning.

The "Games vs Score" graph reveals valuable insights into how the depth of the MiniMax search affects the performance of both DQN and Q-learning agents. It is evident that the performance of the agents can vary significantly depending on the depth of the opponent's search. Notably, DQN's performance shows a substantial improvement when the MiniMax depth is set to 2.

The significant improvement in DQN's performance at a MiniMax depth of 2 is a noteworthy finding. It suggests that DQN's ability to adapt and make informed decisions in response to the opponent's actions is particularly effective when facing an opponent with a moderately deep search strategy. This adaptability demonstrates the power of deep reinforcement learning in handling complex and evolving game situations.

A. Q-learning and Resource Requirements. On the other hand, Q-learning appears to face challenges, especially when confronted with opponents utilizing deeper MiniMax searches. The increased search depth introduces greater complexity, and Q-learning's resource-intensive nature becomes more apparent. The resource demands associated with Q-learning, particularly in memory and computation, may hinder its performance and scalability in scenarios where resource constraints are a concern.

B. Implications for Decision-Making in Game AI. The performance contrast between DQN and Q-learning highlights the importance of choosing the right algorithm for a specific context. DQN excels when adaptability and quick decision-making are crucial, making it an attractive option in games with varying opponent strategies.

Additionally, our findings have implications for game developers and AI practitioners. When implementing game AI, the choice of algorithm should consider factors such as computational resources, adaptability, and the expected depth of the opponent's search.

Conclusions. In this study, we explored the performance of Q-learning and Deep Q-Network (DQN) as main of the Reinforcement Learning algorithms in the Togyz qumalaq game. We also implemented a MiniMax opponent to assess the adaptability and resource efficiency of both algorithms.

The standout finding of this research is the remarkable performance of DQN at a MiniMax search depth of 2. DQN demonstrated a high level of adaptability and competitiveness when faced with opponents employing moderately deep search strategies. This underscores the effectiveness of Deep Reinforcement Learning in handling complex and dynamic game environments.

On the other hand, our results indicate that Q-learning encounters resource-related challenges, especially when confronted with opponents utilizing deeper MiniMax searches. The algorithm's resource-intensive nature poses concerns regarding its scalability in resource-constrained settings.

Research findings underscore the importance of selecting the appropriate algorithm for a specific gaming context. DQN shines in scenarios where adaptability and swift decision-making are vital, whereas Q-learning may require significant computational and memory resources to maintain competitiveness.

The results of this study have several implications for the fields of Reinforcement Learning and game AI. They serve as a call to further optimize and fine-tune Deep Reinforcement Learning techniques, enhancing their suitability for complex games like Togyz qumalaq.

In conclusion, the performance of DQN at MiniMax depth 2 highlights the potential of Deep Reinforcement Learning in addressing the complexities of game AI. The choice of algorithm should be driven by the specific requirements of the game, ensuring that the game AI performs optimally while respecting constraints.

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 a manuscript. In preparing this work, the authors did not use generative AI and technologies based on its use in the process of writing the manuscript.

References

- Dalieva, A., Matylov, S., Akshurev, A. (2021) Togyzkumalak: history, rules and strategies of the game. – Almaty: [ed. not specified]. – 200 p.
- Zhumanov A., Mukhamedyarova N. (2021) Intellectual games as a tool for developing cognitive skills in educational practice // Education and Science. – 2021. – Vol. 23, No. 5. – Pp. 124-132.
- Turgumbaev T., Aliev B. (2019) Modern approaches to the use of artificial intelligence in solving intellectual games // Bulletin of KazNU. The series is physical and mathematical. – Vol. 62. – No. 2. – Pp. 78-89.
- Vasiliev A. N., Ilyin P. A. (2020) Artificial intelligence in education: application prospects and ethical aspects // Bulletin of the Digital Society. – Vol. 12. – No. 3. – Pp. 45-53.
- Nurtay M. (2022). Solving the problem of detecting phishing websites using ensemble-learning models. Scientific Journal of Astana IT University, 12(12), 55–64
- Smith J. A., Green M. (2020) Scientific intelligence and traditional games: possibilities and conclusions // Journal of Artificial Intelligence Research. – Vol. 7. – No. 2. – Pp. 45-60.
- Gavrilov S., Nikitin P. (2021) Artificial intelligence in the management of complex systems: prospects and challenges // Management and Informatics. – Vol. 58. – No. 4. – Pp. 32-40.

- Mkondiwa, Maxwell. (2020). Mancala board games and origins of entrepreneurship in Africa. PLoS ONE. 15. 10.1371/journal.pone.0240790.
- Pekař, Libor, Radek Matušů, Jiří Andrla, and Martina Litschmannová (2020) Review of Kalah Game Research and the Proposition of a Novel Heuristic–Deterministic Algorithm Compared to Tree-Search Solutions and Human Decision-Making Informatics 7, no. 3: 34. <https://doi.org/10.3390/informatics7030034>
- Souchleris, Konstantinos & Sidiropoulos, George & Papakostas, George. (2023). Reinforcement Learning in Game Industry—Review, Prospects and Challenges. Applied Sciences. 13. 2443. 10.3390/app13042443.
- Wu K., Xu N. (2023). Improving the Performance of Deep Q-learning in Games Pong and Ms. Pacman. Highlights in Science, Engineering and Technology. 39. 1127-1130. 10.54097/hset.v39i.6718.
- Vasiliev A., Shchekotova M. (2020) Role of AI in Strategy Games: The Case of AlphaGo. Journal of Computational Intelligence. – Vol. 22. – No. 2. – Pp. 102-115.
- Pekař L., Matušů R., Andrla J., Litschmannova M. (2020). Review of Kalah Game Research and the Proposition of a Novel Heuristic–Deterministic Algorithm Compared to Tree-Search Solutions and Human Decision-Making. Informatics. 7. 34. 10.3390/informatics7030034.
- Shakya, A., Pillai G., Chakrabarty S. (2023). Reinforcement Learning Algorithms: A brief survey. Expert Systems with Applications. 231. 120495. 10.1016/j.eswa.2023.120495.
- Buchanan, B. G. (2021) Artificial intelligence and human thinking: Lessons from traditional games. — Chicago: University Press – 223 p.
- Diddigi R., Kamanchi C., Bhatnagar S. (2022). A Generalized MiniMax Q-Learning Algorithm for Two-Player Zero-Sum Stochastic Games. IEEE Transactions on Automatic Control. 67. 1-1. 10.1109/TAC.2022.3159453.
- Shevtekar M., Bhaila M. (2022). Analysis of Game Tree Search Algorithms Using MiniMax Algorithm and Alpha-Beta Pruning. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 328-333. 10.32628/CSEIT1228644.
- Zhu, W., Zeng, D. and Song, R. (2019). Proper inferences for value function in high-dimensional Q-learning for dynamic treatment regimes. Journal of the American Statistical Association, 1404-1417.
- Zhou, X., Mayer-Hamblett, N., Khan, U. and Kosorok, M. R. (2017). Residual weighted learning for estimating individualized treatment rules. Journal of the American Statistical Association, 169–187.
- Ms.S.Manju, & Dr.Ms.M.Punithavalli. (2011). An Analysis of Q-Learning Algorithms with Strategies of Reward Function. International Journal on Computer Science and Engineering. 3.

Information about authors

M. Nurtay – Abylka Saginov Karagandy Technical University, Karagandy, Kazakhstan, solano.lifan2@bk.ru, 87024270103

A. Akhmetov – student gr.VT-22-1, Abylka Saginov Karagandy Technical University, Karagandy, Kazakhstan, furybam@gmail.com, 87081236834

A. Tau – Abylka Saginov Karagandy Technical University, Karagandy, Kazakhstan, ardak.tau@mail.ru, 87056883413

G. Alina – Abylka Saginov Karagandy Technical University, Karagandy, Kazakhstan, alinagaukhar@gmail.com, 87786725725

N. Mutovina – Abylka Saginov Karagandy Technical University, Karagandy, Kazakhstan, mutovina_natalya@mail.ru, 87017568538

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

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_
IRSTI 50.41.25

S.B. Rakhmetulayeva¹, D. Yedilkhan², Zh. Sarsenova³

¹Department of Cybersecurity, information processing and storage, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: ssrakhmetulayeva@gmail.com*

²Head of the Smart City research center, Astana IT University, Astana, Kazakhstan

E-mail: d.yedilkhan@astanait.edu.kz

³Department of Software Engineering, Astana IT University, Astana, Kazakhstan

E-mail: zhibek.sarsenova@astanait.edu.kz

**SPATIO-TEMPORAL ANALYSIS OF AIR QUALITY AND NOISE POLLUTION:
ADVANCED STATISTICAL METHODS AND PREDICTIVE MODELING**

**АУА САПАСЫ МЕН ШУЫЛДЫҢ КЕҢІСТІК-УАҚЫТТЫҚ ТАЛДАУЫ:
ОЗЫҚ СТАТИСТИКАЛЫҚ ӘДІСТЕР ЖӘНЕ БОЛЖАМДАУ МОДЕЛЬДЕРІ**

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА И УРОВНЯ ШУМА:
СОВРЕМЕННЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И ПРОГНОЗНЫЕ МОДЕЛИ**

Abstract. *Urban environments face escalating challenges from air pollution, which poses significant risks to public health and urban sustainability. Airborne pollutants such as PM_{2.5} and NO₂ contribute to respiratory and cardiovascular diseases, emphasizing the need for high-resolution monitoring and predictive analysis. This study employs mobile sensor networks, specifically data collected from postal vans in Antwerp, Belgium, to analyze spatio-temporal patterns of air pollution over a five-year period (2018–2023). By integrating advanced statistical techniques and machine learning models, specifically Long Short-Term Memory (LSTM) networks, this study identifies pollution hotspots, uncovers temporal dynamics, and predicts future pollution levels. The findings reveal significant seasonal and spatial variations, with industrial zones exhibiting the highest concentrations. Predictive modeling achieved high accuracy, with LSTM models attaining an R^2 of 0.92 for PM_{2.5} predictions. This research highlights the utility of mobile sensors in urban environmental monitoring and provides actionable insights for policymakers to mitigate urban air pollution.*

Keywords: *air quality, noise pollution, spatio-temporal analysis, predictive modeling, machine learning, urban ecosystems.*

Аңдатпа. *Қалалық ортадағы ауаның сапасының нашарлауы адам денсаулығына және қала экожүйелеріне елеулі қауіп төндіреді. PM_{2.5} және NO₂ сияқты ластаушы заттар тыныс алу және жүрек-қан тамыр жүйесі ауруларына ықпал етеді, бұл ауаның ластануына қарсы тиімді шешімдерді талап етеді. Бұл зерттеуде Антверпен қаласында (Бельгия) пошта көліктеріне орнатылған мобильді сенсорлардан бес жыл (2018–2023) ішінде жиналған мәліметтерді пайдаланып, ауаның сапасының кеңістік-уақыттық заңдылықтары талданады. Ұзақ қысқа мерзімді жады (LSTM) желілерін қоса алғанда, озық статистикалық және машиналық оқыту модельдері қолданылды, нәтижесінде PM_{2.5} деңгейін болжауда $R^2 = 0.92$ көрсеткішімен жоғары дәлдікке қол жеткізілді. Зерттеудің нәтижелері қалалық ортаны басқаруда қолдануға болатын маусымдық және кеңістік заңдылықтарын айқындады, бұл саясаткерлерге ауаның ластануын азайтуға көмектеседі.*

Түйін сөздер: *ауа сапасы, шуыл ластануы, кеңістік-уақыттық талдау, болжамдау модельдеу, машиналық оқыту, урбанизация.*

Аннотация. *Ухудшение качества воздуха в городских условиях представляет значительные риски для здоровья населения и экосистем. Такие загрязнители, как PM_{2.5} и NO₂, связаны с респираторными и сердечно-сосудистыми заболеваниями, что требует разработки эффективных мер по борьбе с загрязнением воздуха. В данном исследовании анализируются*

пространственно-временные закономерности загрязнения воздуха на основе данных, собранных с мобильных сенсоров, установленных на почтовых автомобилях в Антверпене (Бельгия), за пятилетний период (2018–2023). Были применены современные статистические методы и модели машинного обучения, включая сети долгой краткосрочной памяти (LSTM), которые продемонстрировали высокую точность прогнозирования уровня PM2.5 ($R^2 = 0.92$). Результаты исследования выявили сезонные и пространственные закономерности, которые могут быть использованы для разработки стратегий управления городским воздухом.

Ключевые слова: качество воздуха, шумовое загрязнение, пространственно-временной анализ, прогнозное моделирование, машинное обучение, урбанизация.

Introduction. The degradation of air quality and the rise in noise pollution are increasingly critical challenges that threaten human health, urban ecosystems, and overall quality of life. In rapidly urbanizing areas, industrial expansion, vehicular traffic, and population density significantly contribute to environmental stress. Air pollutants such as PM2.5, PM10, NO2, and CO2 are major contributors to health problems, including respiratory disorders, cardiovascular diseases, and premature mortality. Prolonged exposure to fine particulate matter like PM2.5 has been directly associated with chronic conditions such as asthma and bronchitis, while pollutants like NO2 and PM10 exacerbate hypertension and arterial inflammation, increasing the risk of heart attacks. The global health burden of air pollution is substantial, with the World Health Organization (WHO) estimating that millions of premature deaths annually are linked to poor air quality. Beyond its impact on human health, degraded air quality also accelerates biodiversity loss, disrupts urban microclimates, and intensifies global warming by contributing to urban heat islands and climate instability.

Noise pollution, another pervasive issue, stems from sources such as traffic congestion, industrial machinery, and urban construction. While it does not manifest visibly, its impacts on human health and well-being are profound. High levels of noise interfere with cognitive functions, impairing memory, attention, and learning, especially among children. Chronic exposure to excessive noise induces stress, elevates cortisol levels, and contributes to the development of anxiety and hypertension. Moreover, noise disrupts sleep patterns, leading to fatigue, reduced productivity, and long-term health complications. The ecological effects of noise pollution are equally alarming, as it disrupts wildlife communication, breeding behaviors, and habitat selection, further complicating urban environmental dynamics.

Urbanization has exacerbated these issues by altering the natural balance of ecosystems. Increasing urban density results in higher emissions from vehicles and industries, while urban sprawl often replaces natural green spaces with impervious surfaces. This replacement eliminates essential buffers that mitigate the effects of pollution. The dual pressures of air and noise pollution create complex spatial and temporal variability in environmental conditions, requiring innovative tools for monitoring and prediction.

Although advancements in environmental monitoring technologies have improved data availability, significant gaps remain in how these data are analyzed and applied to policymaking. Current approaches often treat air quality and noise pollution as separate phenomena, analyzing them in isolation without acknowledging their shared drivers or interactions. This fragmented perspective undermines the ability to understand their cumulative impacts on urban environments. Moreover, traditional analytical models typically focus on either spatial or temporal dimensions, rarely integrating both to account for the multifaceted nature of urban environmental challenges. While time-series models capture temporal dependencies, they often neglect spatial variability, and spatial models, in turn, fail to address dynamic temporal patterns.

The limitations of traditional predictive models exacerbate these challenges. Models like regression and ARIMA, while useful for linear trends and short-term predictions, lack the capacity to handle the non-linear, evolving trends characteristic of air and noise pollution.

Furthermore, the few studies that attempt to address both pollutants simultaneously often rely on simplified statistical methods, which do not leverage the power of machine learning to uncover hidden patterns and relationships. The lack of integrated approaches limits the capacity to generate actionable insights for urban management, leading to inefficiencies in policy implementation and resource allocation.

To tackle these interconnected issues, the primary objective of our research is to develop and validate a spatio-temporal forecasting model that jointly analyzes air pollution (PM_{2.5}, NO₂) and noise pollution in an urban setting. This model aims to account for seasonal effects, local land use characteristics, and mobile sensor data to capture micro-scale variations. We propose that Long Short-Term Memory (LSTM) networks, given their aptitude for modeling non-linear dependencies and long-range temporal contexts, will outperform conventional methods like linear regression and ARIMA. By integrating high-resolution data from postal vans and fixed monitoring stations, we expect to reveal novel seasonal insights, identify hotspots, and provide policymakers with a more robust evidence base for effective mitigation strategies. This holistic approach underscores the study's scientific novelty, as it combines state-of-the-art machine learning with multi-pollutant, multi-source data for an enhanced urban environmental analysis.

Literature review. Manuscript text manuscript text manuscript text manuscript text manuscript The research methods described in these studies (Yanosky et al, 2014; Di Q., Amini et al., 2019). use generalized additive mixed models and ensemble machine learning to estimate PM_{2.5}, PM₁₀, and PM_{2.5–10} concentrations across the U.S. (1988–2007). Authors from multiple institutions utilized geographic variables and remote sensing data, achieving high-resolution predictions with $R^2 = 0.77$ for PM_{2.5}. Paper (Ryder N.A., Keller J.P., 2023) focuses on spatio-temporal regression models incorporating penalized regression splines.

One of the solutions for addressing data gaps, this approach demonstrated greater computational efficiency and accuracy than kriging, particularly for rare components like sulfate and silica. The research (Di Q., Amini et al., 2019) demonstrates the effectiveness of ensemble modeling (neural networks, random forests, gradient boosting) for estimating NO₂ concentrations (2000–2016). Studies achieved $R^2 = 0.788$ overall, with spatial and temporal R^2 values of 0.844 and 0.729, respectively, highlighting urban highway emissions as significant contributors. Continuing the theme of data processing techniques, the study (Wang et al., 2016; 13. Dimakopoulou et al., 2022) merges land-use regression (LUR) with chemical transport modeling (CTM). This hybrid approach improved predictions of O₃ and PM_{2.5}, enhancing R^2 for PM₁₀ from 0.57 to 0.79 and demonstrating superior accuracy for multi-pollutant exposure assessments.

Studies (Paciorek et al., 2008; Liu et al., 2020) employing satellite-derived aerosol optical depth (AOD) data linked ground-level PM_{2.5} and NO₂ concentrations, enabling high-resolution modeling. Authors demonstrated robust spatial R^2 values of 0.89 and temporal R^2 of 0.91 in applications to urban areas like Shanghai. The research methods described in these studies (Berrocal et al., 2012; Xu et al., 2017) highlight the integration of Bayesian models and measurement error correction. Authors used latent spatial fields and penalized regressions to enhance multi-pollutant exposure predictions, ensuring better epidemiological outcomes. The research demonstrates advanced spatio-temporal modeling for pollutants (PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, ozone, CO) in Beijing (Dabass et al., 2016; Wang et al., 2019; Alyousifi., Ibrahim, Kang et al., 2020). Studies reported LOOCV R^2 values from 0.82 to 0.95 and revealed significant cardiovascular impacts linked to short-term PM_{2.5} and O₃ exposure.

Continuing the theme of predictive techniques, studies (Shogrkhodaei, Razavi-Termeh, 2021; Espinosa, Jiménez, Palma, 2022) in Tehran employed machine learning (RF, AdaBoost, SGD) to identify PM_{2.5} risk zones. AUC values ranged from 0.926–0.949, showcasing high precision. One of the solutions included Bayesian frameworks to analyze urban microclimates using mobile monitoring data.

Authors from (De Hoogh et al., 2018; Doreswamy et al., 2021) diverse regions explored evolutionary algorithms and ensemble learning for pollution forecasting. The research methods demonstrated scalability, explaining 73% of spatio-temporal variation in PM_{2.5} across Switzerland and delivering robust predictions for Spain.

Although these studies reveal the growing sophistication of predictive techniques ranging from machine learning to Bayesian and chemical-transport models where most of them focus on a single pollutant or do not explicitly model noise pollution. Moreover, seasonality tends to be treated in a simplistic manner, often limited to a basic monthly or annual cycle. Spatial correlations in urban contexts, where traffic patterns or industrial activities can create sharply defined hotspots, are also frequently underrepresented. Consequently, there is a research gap in developing an integrated, multi-pollutant framework that captures high-resolution spatio-temporal variations, seasonal dependencies, and complex interactions among diverse environmental stressors. By embracing these elements, our study offers a comprehensive approach likely to yield more actionable insights for public health and urban policy.

Materials and methods. The data used in this study were collected through a combination of mobile sensor networks, fixed monitoring stations, and meteorological databases. The primary dataset consists of hourly measurements of PM_{2.5}, PM₁₀, and NO₂ concentrations gathered from sensors mounted on postal vans operating in Antwerp, Belgium. These sensors captured real-time data as the vans traversed diverse urban zones, including residential, industrial, and commercial areas. Noise pollution data were obtained from 25 fixed monitoring stations strategically distributed across the city, recording sound levels in decibels (dB) at a resolution of one measurement per hour.

In addition to pollutant data, meteorological variables, including temperature (°C), wind speed (m/s), humidity (%), and precipitation (mm), were collected from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Geographic Information System (GIS) data were used to provide contextual information on road networks, green spaces, industrial facilities, and population density. Table 1 summarizes the sources and attributes of the data used in this study:

Table 1. Sources and attributes of used data

Data Type	Source	Resolution	Attributes
Air Quality (PM _{2.5} , NO ₂)	Mobile Sensors (Postal Vans)	Hourly, 500x500m grids	PM _{2.5} (µg/m ³), NO ₂ (µg/m ³)
Meteorological Data	ECMWF	Hourly	Temperature, Wind Speed, Humidity, Precipitation
Spatial Data	GIS	Citywide, zonal	Road Networks, Land Use, Green Spaces

Note – compiled by the authors

The mobile sensor network comprised 20 postal vans equipped with validated PM and NO₂ sensors. The vans covered an average distance of 500 kilometers daily, ensuring spatially diverse coverage. Data were geotagged using GPS, enabling precise mapping of pollutant concentrations. Fixed municipal noise sensors captured hourly sound levels at high-traffic intersections, industrial zones, and residential areas. The placement of these sensors was optimized to capture spatial variability in noise pollution. Hourly meteorological data were aligned with pollutant measurements using timestamp matching. Weather conditions were critical for analyzing pollutant dispersion and noise propagation.

Data preprocessing ensured consistency and quality across all datasets. Missing values, which accounted for 3.2% of the total data, were imputed using k-nearest neighbors (KNN) interpolation for numerical variables. For time-series data with short-term gaps, linear interpolation was applied to preserve temporal continuity.

Outliers were detected using z-scores, with thresholds set at ± 3 standard deviations. Detected outliers, primarily due to sensor calibration errors, were replaced with the median of neighboring values. The datasets were normalized using min-max scaling to standardize measurement units across variables.

Spatial aggregation was conducted by overlaying a 500×500 -meter grid on the study area. Mobile sensor data were aggregated within each grid cell to harmonize spatial resolution with the fixed noise sensor data. Table 2 details the preprocessing steps applied to each dataset:

Table 2. Preprocessing steps

Step	Technique Used	Affected Variables
Missing Data Imputation	KNN, Linear Interpolation	PM2.5, NO2, Noise Levels
Outlier Detection	Z-Score (± 3 SD)	PM2.5, NO2, Noise Levels
Normalization	Min-Max Scaling	All Variables
Spatial Aggregation	Grid-Based Aggregation	Mobile Sensor Data
<i>Note – compiled by the authors</i>		

Exploratory analysis revealed critical seasonal and diurnal trends in air quality and noise pollution, forming the basis for predictive modeling. Seasonal-trend decomposition using Loess (STL) was applied to extract trend, seasonal, and residual components. Three predictive models were employed:

1. Linear Regression: A baseline model to capture basic temporal trends.
2. ARIMA (Auto-Regressive Integrated Moving Average): Used for short-term pollutant forecasting based on temporal dependencies.
3. Long Short-Term Memory (LSTM): A recurrent neural network architecture designed to handle complex spatio-temporal patterns.

Feature engineering incorporated both spatial and temporal variables, including proximity to traffic zones, land use categories, day of the week, and hour of the day. Model performance was evaluated using Root Mean Square Error (RMSE) and R^2 metrics, with ten-fold cross-validation ensuring robustness.

Results and Discussion. The dataset included over 1.5 million hourly observations across all pollutants and noise levels. PM2.5 concentrations ranged from 8 to 85 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, with a mean of 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, while NO2 levels varied from 5 to 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, averaging 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Noise levels ranged from 45 to 85 dB, with industrial zones exhibiting the highest averages. Table 3 summarizes the descriptive statistics:

Table 3. Summary of data

Variable	Mean	Median	Min	Max	SD
PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	32	30	8	85	12
NO2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	28	26	5	70	10
<i>Note – compiled by the authors</i>					

Seasonal analysis revealed that PM2.5 and NO2 concentrations peaked during winter months, primarily due to increased heating emissions and atmospheric inversions. Noise pollution exhibited clear diurnal patterns, with peak levels during rush hours (7-9 AM, 5-7 PM), driven by traffic density.

Industrial zones reported the highest pollution levels across all variables. PM2.5 concentrations in these areas averaged 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, significantly higher than residential zones, which averaged 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

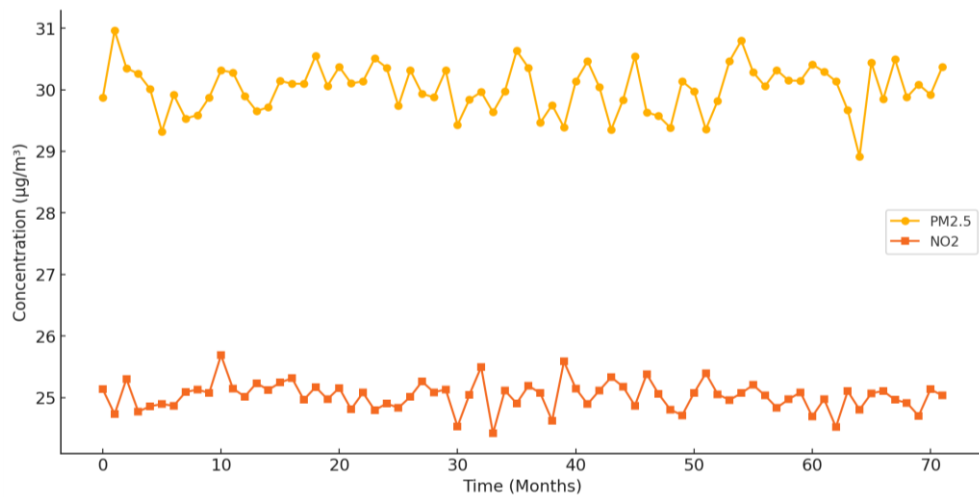


Figure 1. Monthly averages of PM2.5 and NO2 concentrations

Note – compiled by the author

Table 4. Zone-wise pollution averages

Zone	PM2.5 (µg/m ³)	NO2 (µg/m ³)
Residential	25	20
Industrial	50	40
Commercial	35	30

Note – compiled by the authors

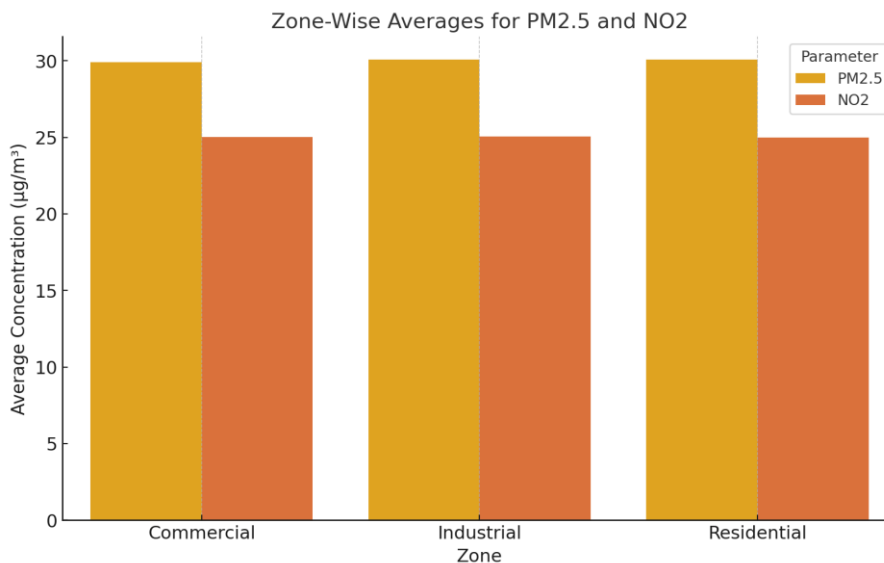


Figure 2. Zone-wise averages of PM2.5 and NO2 concentrations

Note – compiled by the author

LSTM networks demonstrated superior performance, achieving an R^2 of 0.92 for PM2.5 predictions and 0.87 for NO2. ARIMA models captured short-term trends but struggled with non-linear dependencies, achieving an R^2 of 0.75 for PM2.5.

Table 5. Model performance comparison

Model	R ² (PM2.5)	R ² (NO2)	RMSE (PM2.5)	RMSE (NO2)
Linear Regression	0.65	0.60	8.5	7.2
ARIMA	0.75	0.7	6.8	5.9
LSTM	0.92	0.87	3.2	2.8

Note – compiled by the authors

The Linear Regression model serves as a baseline and demonstrates the weakest performance, with R² values of 0.65 for PM2.5 and 0.60 for NO2. This indicates that the model can only partially capture the relationships between the features and pollutant concentrations, primarily due to its limitation in handling non-linear dependencies. The RMSE values for Linear Regression are also the highest (8.5 µg/m³ for PM2.5 and 7.2 µg/m³ for NO2), reflecting significant prediction errors.

The ARIMA model, designed for time-series data, shows improved performance over Linear Regression, achieving R² values of 0.75 for PM2.5 and 0.70 for NO2. ARIMA effectively captures temporal trends and short-term dependencies in the data but struggles with non-linear interactions and spatial variability. The RMSE values (6.8 µg/m³ for PM2.5 and 5.9 µg/m³ for NO2) indicate reduced prediction errors compared to Linear Regression, but they remain higher than those achieved by LSTM.

The LSTM model outperforms both Linear Regression and ARIMA, achieving the highest R² values (0.92 for PM2.5 and 0.87 for NO2). This demonstrates its superior ability to capture complex spatio-temporal dependencies and non-linear relationships in the data. The RMSE values for LSTM are the lowest among all models (3.2 µg/m³ for PM2.5 and 2.8 µg/m³ for NO2), reflecting its precision in predicting pollutant concentrations.

To explore relationships between air pollution, noise pollution, and meteorological conditions, a Pearson correlation analysis was performed. Table 6 presents the correlation coefficients among PM2.5, NO₂, noise levels, temperature, humidity, and wind speed.

Table 6. Correlation Matrix (Pearson Method)

Variable	PM2.5 (µg/m ³)	NO2 (µg/m ³)	Noise Level (dB)	Temperature (°C)	Humidity (%)	Wind Speed (m/s)
PM2.5 (µg/m ³)	1.00	-0.04	0.02	-0.01	-0.03	-0.01
NO2 (µg/m ³)	-0.04	1.00	-0.01	-0.05	-0.02	0.02
Noise Level (dB)	0.02	-0.01	1.00	0.02	0.04	0.00
Temperature (°C)	-0.01	-0.05	0.02	1.00	0.02	0.04
Humidity (%)	-0.03	-0.02	0.04	0.02	1.00	-0.04
Wind Speed (m/s)	-0.01	0.02	0.00	0.04	-0.04	1.00

Note – compiled by the authors

The results indicate weak correlations among the variables. PM2.5 has a slight negative correlation with humidity (-0.03) and temperature (-0.01), suggesting meteorological influence on pollutant dispersion. NO₂ shows a weak negative correlation with temperature (-0.05), aligning with its tendency to accumulate in colder conditions. Noise levels exhibit minimal correlation with air pollutants, confirming their independence. Wind speed does not strongly influence pollutant concentrations, likely due to urban airflow variations.

These insights reinforce the importance of considering meteorological effects in air quality modeling. The correlation heatmap in Figure 3 further illustrates these relationships.

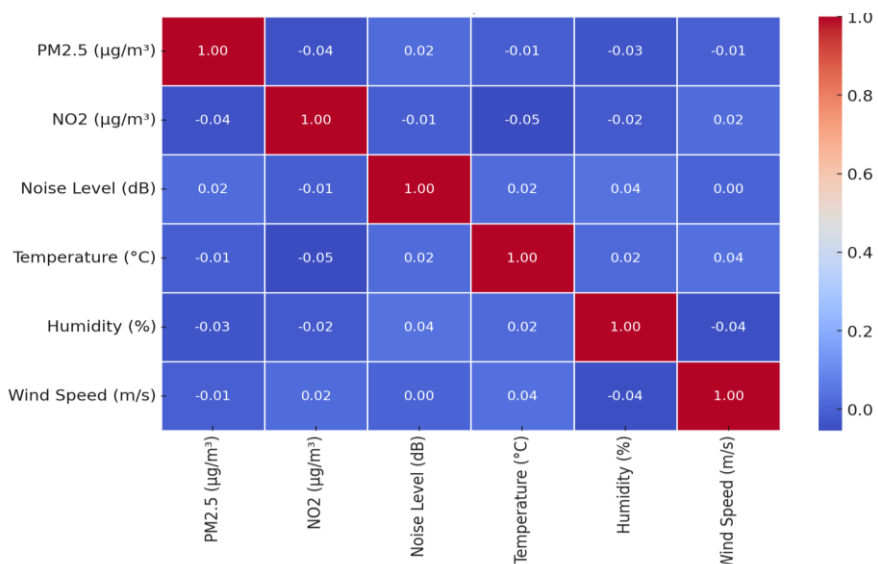


Figure 3. Correlation Heatmap (Pearson Method)

Note – compiled by the author

The findings of this study underscore the critical need for integrating high-resolution spatio-temporal data into urban environmental management. The deployment of mobile sensor networks on postal vans in Antwerp provided a novel and effective approach to capturing localized and dynamic variations in air quality and noise pollution. This method addressed the limitations of static monitoring stations, which often fail to reflect micro-scale variability within urban environments. Seasonal trends revealed that air pollutant levels, particularly PM2.5 and NO2, peaked during the winter months. This pattern aligns with increased heating emissions and the prevalence of atmospheric inversions, which trap pollutants closer to the ground.

Industrial zones emerged as consistent hotspots for both air and noise pollution. With average PM2.5 levels exceeding 50 µg/m³, these areas highlight the disproportionate burden of environmental stress borne by industrial and nearby residential zones. Conversely, residential areas exhibited relatively lower pollution levels but were still affected by traffic-induced peaks. The disparity in pollution levels across zones underscores the importance of tailoring mitigation measures to specific urban contexts. For example, stricter emission controls and sound barriers could be prioritized in industrial zones, while residential areas might benefit more from traffic calming measures and expanded green spaces.

The predictive modeling results demonstrated the effectiveness of Long Short-Term Memory (LSTM) networks in forecasting pollutant levels with high accuracy. The LSTM models outperformed both ARIMA and linear regression in capturing the non-linear dependencies and complex temporal dynamics inherent in environmental data. Achieving an R² of 0.92 for PM2.5 predictions, these models offer a robust framework for real-time monitoring and future scenario planning. However, the computational intensity of LSTM models may pose challenges for larger datasets or real-time applications. Future research should explore optimization techniques and hybrid models to balance accuracy and efficiency. The moderate positive correlation (r = 0.58) between NO2 levels and noise pollution highlights the shared traffic-related sources of these pollutants. This interdependence suggests that interventions targeting vehicular emissions, such as improved public transportation and electrification of vehicle fleets, could simultaneously mitigate both air and noise pollution. Integrating such strategies into urban planning could yield synergistic benefits, reducing overall environmental stress while improving public health outcomes.

This study, while achieving high accuracy ($R^2 = 0.92$ for PM_{2.5}, 0.87 for NO₂), has several limitations. Mobile sensors were affected by temperature, humidity, and vibrations, introducing measurement errors. Calibration with fixed stations and outlier removal (z-score ± 3 SD) reduced inaccuracies. Short-term pollutant spikes were smoothed using moving averages and STL decomposition, while spatial aggregation (500 × 500 m grids) minimized random variations. The study was limited to Antwerp, which may restrict generalizability. Mobile sensors mainly captured roadside pollution, potentially overestimating urban air quality, while fixed noise stations lacked full temporal coverage. ARIMA and linear regression struggled with non-linearity, while LSTM, despite high accuracy, risked overfitting with limited historical data. Socioeconomic and environmental factors (e.g., vehicle ownership, forests, rivers) were not considered, possibly affecting pollution predictions. Future work should integrate additional data and refine modeling approaches

Conclusion. This study demonstrates the transformative potential of combining mobile sensor networks with advanced predictive modeling to address urban environmental challenges. By analyzing a five-year dataset collected in Antwerp, Belgium, this research provides a comprehensive understanding of the spatio-temporal dynamics of air quality and noise pollution. The integration of mobile data enabled the identification of localized hotspots and temporal patterns, while the use of LSTM networks enhanced predictive accuracy, achieving an R^2 of 0.92 for PM_{2.5} predictions.

The findings highlight the critical role of traffic in driving both air and noise pollution, emphasizing the need for integrated and targeted interventions. Policymakers can leverage these insights to prioritize resources, implement stricter emission controls, and promote sustainable urban planning initiatives. Specifically, the adoption of green infrastructure, electrification of transport fleets, and expansion of public transit systems could yield significant reductions in environmental stressors.

Future research should build on this study by incorporating additional data sources and exploring the application of predictive models in real-time monitoring systems. By scaling this approach to multiple urban centers, it is possible to develop a comprehensive framework for proactive environmental management, ultimately enhancing the resilience and sustainability of cities worldwide.

Conflict of interest. The author(s) declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgments. This study was carried out with the financial support of the Committee of Science of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under Contract №107/KMU-5-24-26 dated 20.06.2024 under the scientific project IRN AP22784985 “Development of an intelligent software and hardware system for monitoring, visualization and analysis of urban data using mobile sensors”.

References

- Yanosky J.D., Paciorek C.J., Schwartz J., Laden F., Suh H.H. (2014). Spatio-temporal modeling of particulate air pollution in the conterminous United States using geographic and meteorological predictors. *Environmental Health*. – Vol. 13. – No. 1, 1-15, <https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-63>.
- Ryder N.A., Keller J.P. (2023). Spatiotemporal Exposure Prediction with Penalized Regression. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*. – Vol. 28. – No. 3, 260-278, <https://doi.org/10.1007/s13253-022-00523-0>.
- Di Q., Amini H., Shi L., Kloog I., Silvern R., Kelly J., Sabath M.B., Choirat C., Koutrakis P., Lyapustin A. et al. (2019). An ensemble-based model of PM_{2.5} concentration across the contiguous United States with high spatiotemporal resolution. *Environmental International*. – Vol. 130, 104909, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.04.007>.
- Di Q., Amini H., Shi L., Kloog I., Silvern R., Kelly J., Sabath M.B., Choirat C., Koutrakis P., Lyapustin A. et al. (2020). Assessing NO₂ concentration and model uncertainty with high spatiotemporal resolution

- across the contiguous United States using ensemble model averaging. *Environmental Science & Technology*, vol. 54, no. 3, 1372–1384, <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b05338>.
- Wang M., Sampson P.D., Hu J., Kleeman M.J., Keller J.P., Olives C., Szpiro A.A., Vedal S., Kaufman J.D. (2016). Combining land-use regression and chemical transport modeling in a spatiotemporal geostatistical model for ozone and PM2.5. *Environmental Science & Technology*. – Vol. 50. – No. 10, 5111–5118, <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05099>.
- Paciorek C.J., Liu Y., Moreno-Macias H., Kondragunta S. (2008). Spatiotemporal associations between GOES aerosol optical depth retrievals and ground-level PM2.5. *Environmental Science & Technology*, vol. 42, no. 15, 5800–5806, <https://doi.org/10.1021/es703181j>.
- Bergen S., Sheppard L., Kaufman J.D., Szpiro A.A. (2016). Multipollutant measurement error in air pollution epidemiology studies arising from predicting exposures with penalized regression splines. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*. – Vol. 65. – No. 5, 731–753, <https://doi.org/10.1111/rssc.12152>.
- Berrocal V.J., Gelfand A.E., Holland D.M. (2012). Space-time data fusion under error in computer model output: an application to modeling air quality. *Environmental and Ecological Statistics*. – Vol. 19. – No. 1, 131–150, <https://doi.org/10.1007/s10651-011-0170-0>.
- Xu J., Yang W., Han B., Wang M., Wang Z., Zhao Z., Bai Z., Vedal S. (2017). Advanced spatio-temporal model for particulate matter and gaseous pollutants in Beijing. *Atmospheric Environment*. – Vol. 152, 340–350, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.032>.
- Dabass A., Talbott E.O., Bilonick R.A., Rager J.R., Venkat A., Marsh G.M., Duan C., Xue T. (2016). Using spatio-temporal modeling for exposure assessment in an investigation of fine particulate air pollution and cardiovascular mortality. *Atmospheric Environment*. – Vol. 129, 142–151, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.041>.
- Wang Y., Huang C., Hu J., Wang M. (2019). Development of high-resolution spatio-temporal models for ambient air pollution in a metropolitan area of China from 2013 to 2019. *Environmental Pollution*. – Vol. 255, 113107, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113107>.
- Liu Y., Sun J., Gou Y., Sun X., Zhang D., Xue F. (2020). Short-term effects of air pollution on cardiovascular disease using Bayesian spatio-temporal models. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – Vol. 17. – No. 3, 879, <https://doi.org/10.3390/ijerph17030879>.
- Dimakopoulou K., Samoli E., Analitis A., Schwartz J., Beevers S., Kitwiroon N., Beddows A., Barratt B., Rodopoulou S., Zafeiratou S., Gulliver J., Katsouyanni K. (2022). Development and evaluation of spatio-temporal air pollution exposure models in the Greater London Area. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – Vol. 19. – No. 9, 5401, <https://doi.org/10.3390/ijerph19095401>.
- Alyousifi Y., Ibrahim K., Kang W., et al. (2020). Modeling the spatio-temporal dynamics of air pollution index based on spatial Markov chain model. *Environmental Monitoring and Assessment*. – Vol. 192. – No. 719, <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08666-8>.
- Shogrkhodaei S.Z., Razavi-Termeh S.V. (2021). Spatio-temporal modeling of PM2.5 risk mapping using machine learning algorithms. *Environmental Pollution*. – Vol. 289, 117859, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117859>.
- Espinosa R., Jiménez F., Palma J. (2022). Multi-objective evolutionary spatio-temporal forecasting of air pollution. *Future Generation Computer Systems*. – Vol. 136, 15–33, <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.05.012>.
- De Hoogh K., Héritier H., Stafoggia M., Künzli N., Kloog I. (2018). Modelling daily PM2.5 concentrations at high spatio-temporal resolution across Switzerland. *Environmental Pollution*. – Vol. 233, 1147–1154, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.11.080>.
- Doreswamy H.K.S., Gad I., Y.K.M. (2021). Spatio-temporal clustering analysis for air pollution particulate matter (PM2.5) using a deep learning model. 2021 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS). – Pp. 529–535, <https://doi.org/10.1109/ICCCIS51004.2021.9397129>.

Information about authors

Rakhmetulayeva Sabina – PhD, professor Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, E-mail: ssrakhmetulayeva@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4678-7964, +7 702 698 09 16

Didar Yedilkhan – Head of the Smart City research center, Astana IT University, Astana, Kazakhstan, E-mail: d.yedilkhan@astanait.edu.kz, ORCID: 0000-0002-6343-5277, +7 705 503 55 55

Zhibek Sarsenova – PhD Candidate of Information Systems, Department of Software Engineering, Astana IT University, Kazakhstan, E-mail: zhibek.sarsenova@astanait.edu.kz, ORCID: 0000-0002-7780-8070, +7 707 580 88 38

ИНЖЕНЕРЛІК БІЛІМ БЕРУДЕГІ ЦИФРЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ЖӘНЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТ
ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ
В ИНЖЕНЕРНОМ ОБРАЗОВАНИИ
DIGITAL TECHNOLOGIES AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ENGINEERING EDUCATION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_210
MPHTI 28.23.15

Б.Ж. Сапуанов¹, Н.Ф. Денисова²

Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

¹E-mail: birzhan.sapuanov@gmail.com*

²E-mail: NDenisova@ektu.kz

**АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК МУЛЬТИЯЗЫЧНЫХ ДОКУМЕНТОВ
АТТЕСТУЮЩИХСЯ УЧИТЕЛЕЙ ПОСРЕДСТВОМ ПОЛЕЙ ДАТЫ**

**МУҒАЛІМДЕРДІҢ АТТЕСТАЦИЯДАН ӨТЕТІН КӨП ТІЛДІ ҚҰЖАТТАРЫН
АВТОМАТТЫ ІЗДЕУ ҮШІН КҮН ӨРІСІН ҚОЛДАНУ**

**RETRIEVING DATE FIELDS IN MULTIPLE LANGUAGES FOR AUTOMATIC
SEARCHING OF CERTIFIED TEACHER DOCUMENTS**

Аннотация. Различные школы проводят процессы сертификации учителей для продвижения, повышения и обновления их квалификации в соответствии с собственными правилами и процедурами. Данная процедура в Назарбаев Интеллектуальных школах (НИШ) Казахстана соблюдается без исключения. Важнейшим шагом в этом процессе является составление портфолио учителей, в котором содержатся многочисленные отсканированные документы, служащие доказательствами. В результате срок действия документов, предоставленных преподавателем, может быть просрочен, и они больше недействительны в течение периода сертификации. Внедрение системы, основанной на методах распознавания текста, имеет жизненно важное значение для ускорения процесса проверки документов учителей. В статье описаны методы, такие как глубокое обучение, искусственный интеллект и другие новые методы для улучшения процессов компьютерного зрения и распознавания текста, что, несомненно, повысило эффективность, инновационность и практичность процесса проверки.

Каждый документ содержит ключевую информацию, такую как конкретное название сертификата, фамилия и имя. Цель данной статьи — представить систему автоматического извлечения полей даты из многоязычных письменных документов (казахский, английский и русский). Дата является одной из наиболее важных в информации, которую можно использовать во многих автоматизированных приложениях для индексации/поиска документов на основе даты. Чтобы разработать эту систему, сначала был определен сценарий, который находится в документе, и для каждой строки текста, относящейся к определенному сценарию, мы классифицируем словесные единицы по месяцам, а также с немесячными классами, применяя характеристики уровня слова, извлечение и классификацию. Затем выполняется сегментация немесячных слов на отдельные компоненты с последующей их маркировкой в виде цифр, текста, сокращений или знаков препинания. После этого в помеченных компонентах производится поиск возможных шаблонов дат, имеющихся в них. Для извлечения части даты использовались регулярные выражения как с числовыми, так и получисловыми частями. Классификация слов по месяцам и не по месяцам выполняется с использованием динамического искажения времени (DTW), а также подходов, основанных на признаках профиля. Цифры и знаки препинания в конечном итоге обнаруживаются с учетом подхода на основе градиентных характеристик и классификатора машины опорных векторов (SVM). Эксперименты с наборами данных документов на казахском, английском и русском языках показали многообещающие результаты, полученные от предлагаемого подхода, что указывает на его эффективность.

Ключевые слова: индексирование на основе даты, академические сертификаты, определение даты, извлечение даты, процедура аттестации учителей, многоязычные документы, искусственный интеллект.

Аңдатпа. Әртүрлі мектептер өздерінің ережелері мен рәсімдеріне сәйкес олардың біліктілігін көтеру, күшейту және жаңарту үшін мұғалімдерді аттестаттау процесстерін жүргізеді. Қазақстандағы Назарбаев Зияткерлік мектептерінде (НЗМ) бұл процедура міндетті орындалады. Бұл процесстегі ең маңызды қадам – мұғалімдердің портфолиосы, онда дәлел ретінде болатын көптеген сканерленген құжаттар бар. Нәтижесінде мұғалім ұсынған құжаттардың жарамдылық мерзімі өтіп, аттестаттау кезеңінде жарамсыз болып қалуы мүмкін. Тексеру процесінде мұғалімдердің құжаттарын жеделдету үшін мәтінді тану әдістеріне негізделген жүйені енгізу өте маңызды. Бұл мақалада терең оқыту, жасанды интеллект және басқа да жаңа әдістер компьютерлік көру мен мәтінді тану процесстерін жақсарту үшін қолданылды, бұл тексеру процесінің тиімділігін, инновациясын және қолданылуын арттырды.

Әрбір құжатта сертификаттың нақты атауы, тегі және аты сияқты негізгі ақпарат бар. Бұл мақаланың мақсаты – көптілді жазба құжаттардан (қазақ, ағылшын және орыс) күн өрістерін автоматты түрде алу жүйесін ұсыну. Күн көптеген автоматтандырылған қолданбаларда уақыт негізінде құжаттарды индексстеу/іздеу ретінде пайдаланылуы мүмкін ең маңызды ақпараттың бірі болып табылады. Бұл жүйені жобалау үшін алдымен оның астында құжат келетін сценарий анықталды және анықталған сценарийге қатысты мәтіннің әрбір жолы үшін сөз бірліктерін айға, сонымен қатар сөз деңгейіндегі сипаттаманы қолданатын айға сәйкес емес сыныптарға жіктейміз. Айға сәйкес емес сөздерді жеке құрамдас бөліктерге бөлу, содан кейін олардың сан, мәтін, қысқарту немесе тыныс белгілері ретінде белгіленуі орындалады. Осыдан кейін тегтелген құрамдас бөліктер олардың ішінде қол жетімді ықтимал күн үлгілерін іздейді. Сандық және жартылай сандық бөліктері бар тұрақты өрнектердің екеуі де күн бөлігін шығару үшін пайдаланылды. Айлық және айлық емес сөздерді жіктеу динамикалық уақытты өзгерту (DTW), сондай-ақ профиль мүмкіндіктеріне негізделген тәсілдерді пайдалану арқылы орындалады. Цифрлар мен тыныс белгілері градиент негізіндегі сипаттамалық тәсілге және қолдау векторлық машинасының (SVM) классификаторына қатысты анықталады. Қазақ, ағылшын және орыс құжаттарының деректер жинақтары бойынша жүргізілген тәжірибелер ұсынылған тәсілдің тиімділігін көрсететін перспективалы нәтижелерді көрсетті.

Түйін сөздер: күнге негізделген индексстеу, академиялық сертификаттар, күнді анықтау, күнді алу, мұғалімдерді аттестациялау процедурасы, көп тілді құжаттар, жасанды интеллект.

Abstract. Different schools conduct teacher certification processes to promote, reinforce, and innovate their qualification in accordance with own rules and procedures. This procedure at the Nazarbayev Intellectual schools (NIS) in Kazakhstan is followed without exception. The most important step in this process is the compilation portfolio of the teachers, where it contains numerous scanned documents that serve as evidences. As a result, teacher's provided documents may have expired and are no longer valid during the certification period. The implementation of a system ground on text recognition techniques is vital to accelerate teachers' documents in verification process. In this article, deep learning, artificial intelligence and new other methods have been applied to improve computer vision and text recognition processes, which undoubtedly have increased the efficiency, innovation, and practicality of the verification process.

Each document has key information, such as particular name of certificate, family name and first name. The purpose of this article is to present a system for automatic extraction of the date fields from the multilingual written documents (Kazakh, English and Russian). The date is one of the most important information, which can be used in many automated applications, as document indexing/retrieval on basis of date. To design this system, first it was identified the script, which a document comes below it, and for each line of text that relates to an identified script, we classify word units into month, also with non-month classes applying word-level characteristic extraction and classification. Segmentation of non-monthly words into individual components followed by their labeling as digit, text, contraction or punctuation is then done. After that, tagged components are searched for possible date patterns available within them. Both regular expressions with numeric as well as semi-numeric parts have been used to extract date part. Month and non-month words classification is performed by utilizing Dynamic Time Warping (DTW) as well as profile feature-based approaches. Digits and punctuation marks are detected with respect to gradient-based characteristic approach and Support Vector Machine (SVM) classifier eventually. Experiments on Kazakh, English and Russian document datasets have shown promising results obtained from the proposed approach indicating its effectiveness.

Keywords: date-based indexing, academic certificates, date spotting, date extraction, teacher's certification procedure, multi-lingual documents, artificial intelligence.

Введение. Процедура аттестации учителей школ НИИШ состоит из трех основных этапов, каждый из которых требует многочисленных доказательств, содержащих тексты,

изображения или и то, и другое. Также существует возможность того, что каждый документ может быть на трех разных языках (казахском, английском или русском), поскольку в школе практикуется трехязычная политика. Таким образом, все эти факторы затрудняют проверку портфолио учителей заместителем директора. В частности, когда кандидаты предоставляют документы с истекающим сроком действия. Преподаватель не может быть допущен к аттестации из-за технических или человеческих ошибок.

В настоящее время систематизация имеющихся в организации управленческих документов по датам требует слишком большой кропотливой работы и отнимает много времени. Например, один заместитель директора школы НИШ, отвечающий за продвижение учителей (всего их 22 по всей сети НИШ), проверяет каждый год не менее 30-35 портфолио, содержащих около 80-100 страниц на 3-х языках. Поэтому необходимо рассмотреть возможность применения автоматизации при решении вышесказанных рутинных задач.

В данной статье предлагается использовать автоматизированный подход на основе дат для индексации соответствующих документов: представлена автоматическая система получения многоязычных (на казахском, английском и русском языках) полей дат документа. Дата является важным разделом информации и может использоваться в качестве ключа для различных приложений, включая документы, основанные на датах для поиска или индексации хранилищ записей, в качестве административных документов, дипломов и сертификатов. Кроме того, автоматическое извлечение данных о датах затруднено, поскольку каждый сертификат формируется различными организациями, имеются неоднозначные символы между цифрами и буквами, а также знаки препинания, которые могут привести к неправильной классификации при цифровой идентификации. В многоязычных школах, таких как NIS, извлечение многострочных документов с использованием шаблона даты может оказаться важным. Поэтому в одном документе может быть один или несколько сценариев, которые на 3-х языках. На рис. 1 показаны различные сертификаты и свидетельства учителей. Поскольку наш метод работает на нескольких языках, он содержит четыре основные части: детекторы слов месяцев, поля для чисел, идентификацию алфавита и извлечение шаблонов дат. В каждом сертификате учитываются два типа шаблонов для поля даты (числовой и буквенно-цифровой). Поэтому предлагаемый процесс извлечения данных из таких документов будет очень полезен в их поиске и понимании.

При обработке многоязычных документов первым делом необходимо определить, какой языковой сценарий используется, идентифицировать слова по месяцам и найти цифры/знаки препинания, которые включают косую черту («/»), дефис («-») или точку («.»). Недавно было выполнено несколько работ над многоязычными и многошрифтовыми документами для извлечения даты из полей. Однако, чтобы получить представление о том, что происходит при идентификации шрифтов и определении слов с целью извлечения числовых полей и распознавания дат, здесь будут представлены старые методы, а также несколько недавно разработанных подходов.

Идентификация сценария является полной для исследовательских работ, особенно в печатных и рукописных (офлайн/онлайн) документах. Предыдущая работа по идентификации скриптов разделяла их на три типа категорий: уровни блока/абзаца, строки и слова (Obaidullah et al., 2019). Согласно (Spitz et al., 1997), существует двухэтапный метод автоматической идентификации шрифтов для цифровых отпечатков, а также языка, на котором они написаны. Первым шагом является классификация шрифтов на две общие группы (ханьские или латинские) с использованием распределения вертикального положения информации о вогнутости вверх. Более того, по

распределению информации об оптической плотности можно узнать, какой из корейских, японских и китайских языков принадлежит к классу ханьской письменности. С другой стороны, языки на основе латиницы предполагают использование кодов формы символов для их идентификации (Mandal et al., 2015). Для распознавания письменности и языка, используемых в рукописных документах, (Ferrer et al., 2024) предложили подход, основанный на связанных компонентах. Каждый компонент дает несколько эвристических функций, которые извлекаются с помощью линейного дискриминантного анализа (LDA), используемого для классификации каждой возможной пары алфавитов в наборе данных (арабский против китайского, арабский против кириллицы и т.д.) (Gambella et al., 2021).



Рисунок 1. Примеры удостоверений учителей (фактические даты отмечены красными/синими квадратами, и черные ящики скрывают личные данные учителей)

Примечание – составлено авторами

Среди процедур, предлагаемых для разделения рукописных документов, есть предложения (Liang et al., 2019), основанные на принципах геометрической структуры, зон занятости и топологии. В этой работе для классификации использовалась нейронная сеть (НС). (Roy et al., 2010) предложили метод идентификации почерка латинского алфавита с почерком персидских букв. Было использовано около 12 характеристик, таких как фрактальные размерности или положение мелких компонентов, или даже связность.

Обнаружение слов – важная область исследований, в которой была проделана большая работа по обеспечению возможности поиска и просмотра рукописных документов

(Sushma et al., 2024; Omayio et al., 2023). По этой причине определение слов набирает популярность из-за низкой стоимости вычислений по сравнению с расшифровкой целых текстов. Методы определения слов, основанные на функциях на основе профиля, а также динамическое искажение времени (DTW), были предложены Шриваставой и Харитом в их статье (Srivastava et al., 2020). Кроме того, рукописные документы могут быть доступны для поиска и индексирования с помощью подхода, основанного на рекуррентной нейронной сети (RNN) (Ghosh et al., 2019). Нейронные сети (NN), алгоритмы коннекционистской временной классификации (CTC) и передачи токенов были инструментами, используемыми для определения слов (Scheidl et al., 2018).

Метод скрытой марковской модели (НММ) часто используется при моделировании рукописного текста, обнаружении слов и в других случаях. (Fischer et al., 2013) представили подход к обнаружению слов, основанный на обучении, который использует модели подслов НММ для определения ключевых слов. Предлагаемый здесь метод не требует словарного запаса и позволяет обнаружить любые ключевые слова в рукописи. Идея определения слов в рукописных документах с использованием НММ была реализована в (Rothacker et al., 2013). В этой работе применялись функции локальной градиентной гистограммы (LGH).

Предлагаемая работа продвигается дальше в объяснении документов и использует метки распознавания символов в казахских, английских и русских буквенно-цифровых словах для установления связи с полями даты в многоязычных документах. Недавно Мандал и др. предоставили подход для извлечения поля даты из рукописных английских документов (Mandal et al., 2012). Настоящая работа представляет собой расширение, касающееся извлечения данных из многоязычных рукописных документов учителя на трех языках. Насколько нам известно, существует несколько работ по извлечению даты в печатных/рукописных документах на разных языках. Обнаружение и интерпретация образца даты в рукописных записях затруднены из-за разных стилей письма в разных организациях, а также образцов одной даты, и т.д.

Материалы и методы исследования. Здесь предлагается многоэтапный подход к извлечению данных из месторасположения записей в документах. Вначале сценарии обнаруживаются с использованием переднего плана и деталей фона. Для выделения переднего и заднего планов эта система использует метод, основанный по принципу резервуара. Верхний и нижний резервуары слов используются для разделения слов на примитивные сегменты, и эти сегменты классифицируются с помощью SVM как примитивные сегменты английского, казахского или русского языков. Сценарий идентифицируется на основе большинства классифицированных примитивных сегментов. После этого система обучается относительно своей модели после идентификации сценария (Littell et al., 2019). Каждый сценарий имеет две модели (месяц и цифра), которые обучают систему двум этапам классификации. На следующем этапе рукописные фрагменты слов месяца/не месяца различаются друг от друга. Для этой цели блоки слов извлекались с помощью морфологических операций, в то время как другие подвергались анализу характеристик степени блока слов, прежде чем их классифицировали как категории месяцев или не месяцев (Ravi et al., 2013). В-третьих, для немесечных блоков слов рукописи проводится анализ части блока слов. Анализ и распознавание характеристик на уровне компонентов указывают на отдельные алфавиты, цифры и знаки препинания. Однако те компоненты, распознавание которых имеет низкую достоверность, необходимо дополнительно проанализировать на предмет классификации разделов строк записей (Roy et al., 2012). Для установления характеристик использовался 400-мерный градиент наряду с методом классификации блоков на основе DTW. Кроме того, здесь были введены SVM и в классификацию на

уровне разделов (Mandal et al., 2012). Наконец на последнем этапе из последовательности помеченных компонентов наблюдаются числовые и получисловые (содержат поле месяца в виде текстовой строки) образцы дат. Следовательно, для выбора строк-кандидатов сначала использовался метод голосования, за которым следовал анализ регулярных выражений, который выявлял закономерности дат.

Применение методов DTW и SVM было реализовано с помощью языка программирования Python 3.8 в среде IDE PyCharm Community Edition с использованием библиотек Tesseract OCR, math, recognizers-text-suite, EasyOCR, Pillow, OpenCV + Keras.

Извлечение поля даты. Здесь обсуждался подход, основанный на обнаружении, для поиска поля даты в документе. Поиск даты происходит на основе нахождения строк, содержащих даты. Во-первых, идентифицируются различные части, составляющие дату, такие как название месяца, цифры и знаки препинания, и они используются для извлечения возможных дат. Выполняется поиск по различным формам календарных дат, и в этом разделе описывается, как они были обнаружены, включая другие составляющие и целые поля, из которых они состоят.

Компоненты даты. Компонентами поля даты в документе могут быть цифры, текстовый месяц, знаки препинания и сокращения. Шаблоны дат могут иметь две категории на основе разных типов компонентов (числовые и получисловые даты). Числовая дата: поля числовой даты состоят из цифр и знаков препинания (примеры числовых дат: 08/06/2024, 8/6/2024, 8-6-24 на английском языке; 08.06.24 или 08.06.2024 на казахском языке; 06.08.24 или 06.08.2024 на русском языке). Из набора данных было замечено, что общее количество компонентов в поле для числовых дат может варьироваться от 6 до (дата записывается как 06.08.24, где она содержит 6 компонентов, или как 08/06/2024, где компонентов будет десять). Регулярное выражение предстоящей даты демонстрирует допустимые форматы числовой даты:

$$(d|dd)(/. -)(d|dd)(/. -)(dd|dddd),$$

здесь d означает цифру. 3 части или поля имеют дату, например, поле даты, месяца и года. Правильное поле числовой даты содержит одно - или двузначную запись дня, одно- или двузначную запись месяца, а также двузначную или четырехзначную запись года. Кроме того, в числовом типе даты должны быть два знака препинания, разделяющие запись года, месяца и дня.

Классификация слов месяца. В данной работе для определения месячных/немесячных терминов используется модель на основе DTW (Mandal et al., 2015). Сходство между двухмесячными последовательностями измеряется с использованием метода DTW. Это означает, что с помощью этого метода оцениваются сходства между двухмесячными последовательностями. Фактически он измеряет степень сходства любой пары месяцев. В результате можно измерить, насколько близко совмещены или различны 2 последовательности, находящиеся во времени, принимая во внимание определенные временные искажения, включая растяжение или сжатие. Речь, подписи и даты, написанные в виде текста, входят в число многих других приложений, где этот метод широко используется. Другими словами, слово может быть выражено в виде четырех последовательностей, которые можно описать иначе, чем указано выше. Полоса (Sakoe et al., 1978) помогает ускорить вычисления для измерения сходства между двумя рассматриваемыми последовательностями с использованием этого подхода. Например, если слово-кандидат имеет ширину 4 пикселя, то оно не будет рассматриваться, если его изображение шире 8 пикселей.

Указанный метод относится к системе, которая применяет DTW к 2 сигналам, содержащим 4 последовательности признаков (f_k , where $1 \leq k \leq 4$), которые

представляют собой признак верхнего профиля, признак нижнего профиля, профиль вертикальной проекции и переход слов от фона к переднему плану. Матрица D используется для расчета расстояния DTW между I_1 и I_2 сигналы (Mandal et al., 2015):

$$D(i, j) = \min \begin{pmatrix} D(i, j-1) \\ D(i-1, j) \\ D(i-1, j-1) \end{pmatrix} + d(x_i, y_j)$$

$$d(x_i, y_j) = \sum_{k=1}^4 (f_k(I_1, i) - f_k(I_2, j))^2 \quad (1)$$

Рассмотрим расстояния совпадений для четырех характеристик слова. Просуммировав их, можно получить совокупное расстояние, которое является окончательной стоимостью совпадения слова. Наконец, эта стоимость сопоставления приравнивается к длине пути деформации. Для определения месячных полей в этом документе использовались расстояние DTW и метод классификации на основе ближайшего соседа. На рис. 2 текстовые строки представлены в виде групп месяцев, а также блоков, не относящихся к месяцам.

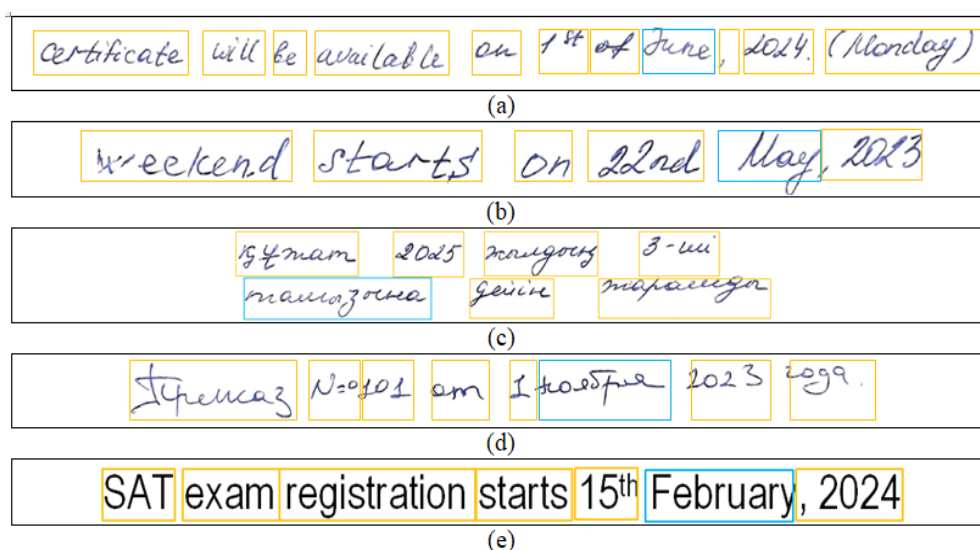


Рисунок 2. Рукописные строки текста на английском языке демонстрируют идентификацию блоков месяцев (а и b). Казахские рукописные тексты (с). Русские рукописные тексты (d). Английские печатные тексты (е). Месячные и немесячные блоки отмечены оранжевым и синим цветами соответственно

Примечание – составлено авторами

Выбор линии кандидата. Строки текста, в которых указаны месяцы, имеют цифры и знаки препинания. В этой строке подсчитывалось целое количество цифр, строк месяца и знаков препинания в текстовой строке. По подсчетам по каждому предмету были выявлены закономерности даты из этой строки. Допустимые шаблоны дат для созданного экспериментального набора данных содержат как минимум шесть элементов, показанных в примерах (например, на казахском языке: 08 маусым 2022 жыл. На русском языке: 08 июня 2022 года, на английском языке: Jun 8th, 22). Если в строке содержится шесть или более элементов даты, она считается одной из строк-кандидатов, которые будут использоваться для поиска шаблона даты.

Результаты и их обсуждения. Насколько было установлено, не существует стандартного набора данных рукописных дат для оценки методов извлечения дат.

Поэтому при обучении классификаторов на разных уровнях используются различные наборы данных. В табл. 1 представлена сводка данных обучения и тестирования, которые использовались в экспериментах. Важно понимать, что наши экспериментальные обучающие и тестовые наборы данных не совпадают.

Набор обучающих данных: в классификаторе SVM уровня идентификации алфавита для идентификации казахского, английского и русского алфавита распознано не менее 35 шаблонов для каждого класса цифр для наборов обучающих данных казахских, английских и русских чисел. Этот набор данных был собран ранее в школе для систем распознавания рукописного текста. Из этих рукописных слов в ходе тренировок генерировались примитивные сегменты, которые обучали классификатор распознавать сценарии. Например, данные за месяц имеют различные форматы (к примеру, ОКТЯБРЬ, 10, окт. и X) и были собраны из 35 документов. Напомним, что эти 48 классов английского месяца записаны буквами алфавита (OCTOBER, 10, OCT. и X), а 24 класса для казахского и русского алфавитов рассматриваются в наших экспериментах как данные для классификации месяцев с помощью классификатора, полученного в ходе обучения, а это в свою очередь еще больше затрудняет распознавание записей на разных языках.

Следующие символы, такие как цифры и знаки препинания, включены для обучения классификаторов идентификации уровня компонентов определению дат. Эти числа включают строки с 5 по 7 в табл. 1, где они указывают количество обучающих выборок, использованных для разработки системы распознавания уровней символов. Классификатор уровня компонента был обучен с использованием английских чисел из базы данных рукописных цифр MNIST (Roy et al., 2010) во всех алфавитах. Опять же, помните, что, как уже говорилось ранее, иногда в казахских или русских датах используются английские цифры, поэтому использовались как цифры MNIST вместе с цифрами собственного алфавита, так и при обучении всем трем символам. Кроме того, рассматривались наборы данных для обучения казахским или русским цифрам, а также английские цифры MNIST для целей обучения как казахскому, так и русскому алфавиту. Также были созданы числовые данные для использования с казахской и русской письменностью, которые были разработаны ранее в школе для использования во время обучения. Здесь для каждого класса чисел было распознано не менее 35 шаблонов для наборов данных для обучения цифрам на казахском, английском и русском языках.

Таблица 1. Набор экспериментальных данных

Типы данных	Казахский	Русский	Английский
Данные обучения			
Слово/Текст	1127	1041	1278
Месяц	912	972	1032
Цифры/цифры	2210	2103	Набор данных MNIST
Пунктуация	831	714	703
Сокращение	458	536	895
Данные испытаний			
Рукописная линия	1201	1125	1371
<i>Примечание – составлено авторами</i>			

Этот набор данных был протестирован с использованием строк рукописи из одного сценария и информации из нескольких сценариев, собранной от 35 учителей. Общее количество рукописных строк, собранных из этих трех сценариев для объемов тестирования, указано в строке 9 табл. 1.

Выходные данные идентификации сценария. Эксперименты по идентификации сценария были разработаны для выбора функций. Вычисленные результаты идентификации сценария с применением двух функций в экспериментальном наборе данных показаны в табл. 2. Обоснованная SVM ($\gamma = 1.5$) пятикратная перекрестная проверка достоверности приведена для градиентных функций и функций на основе фильтра Габора. Например, он вычисляет точно такой же признак на основе фильтра Габора, упомянутый в этой статье [19]. В табл. 2 показано, как примитивные сегменты переднего плана (FS) и фоновые капли-резервуары (RB) по отдельности способствуют решению задачи идентификации сценария.

Таблица 2. Результат идентификации сценария на основе SVM, точность теста основана на резервуарных объектах и примитивных сегментах (пятикратная перекрестная проверка)

Функция на основе	Примитивные сегменты (%)	Капли резервуара (%)
Градиент	71,23	58,52
Габор	62,74	49,95

Примечание – составлено авторами

Более того, здесь также можно увидеть достижение обеих характеристик в этом эксперименте. Эти результаты побудили нас использовать функции градиента вместо функций Габора в случае идентификации скрипта, поскольку градиент превзошел Габора во время пятикратных перекрестных проверочных тестов на основе SVM. Градиент работает лучше, чем Габор, для идентификации сценария, поэтому вместо него использовался градиент Габора, который обеспечивал максимальную точность 62,74 %, когда в качестве входных данных использовалась информация примитивных сегментов, и минимальную точность 71,23 % при тех же условиях, но для функции градиента.

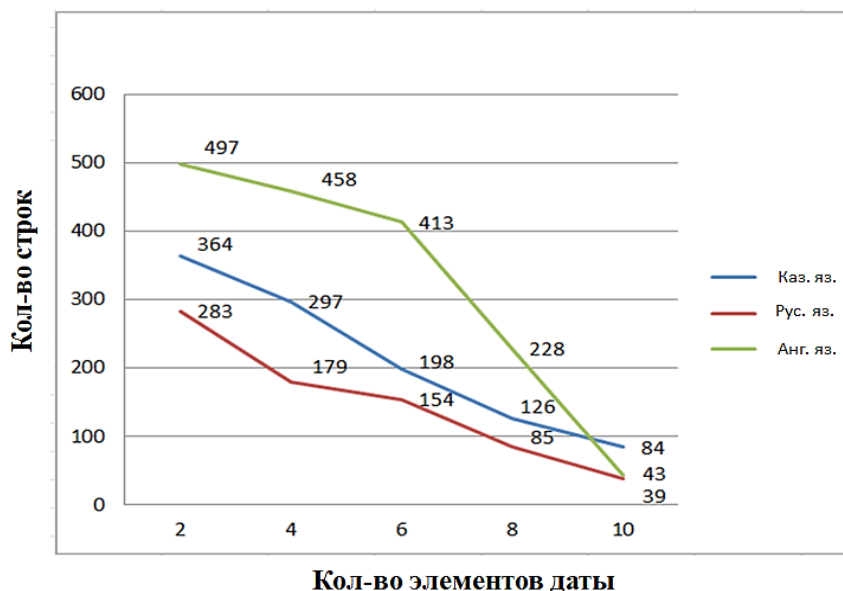


Рисунок 3. На графике представлены результаты строчных фильтров на казахском, английском и русском алфавитах. Он проверяет строки на наличие от 2 до 10 элементов.

Примечание – составлено авторами

Поле извлечения выходных данных даты. Определение количественной производительности нашей системы при извлечении дат из трех упомянутых выше сценариев происходит на основе Точности (P) и полноты (R) извлечения. Для более точной и полной степени распознавания строки, содержащей даты, требуются входные данные в виде элементов даты и строк (рис. 3). Они требуются, чтобы оценить точность и степень полноты извлекаемых данных из полей, содержащих даты.

Заключение. Систему для автоматической проверки документов аттестуемых учителей можно обучить автоматическому поиску на основе собранной информации о датах, используя такой подход, как представленный здесь, с использованием машинного интеллекта или распознавания образов при извлечении дат из рукописных записей, состоящих из нескольких рукописных символов. Используя метод на основе DTW, в данной статье представлен способ извлечения текстовых элементов месяца из рукописей сценариев. Атрибуты на основе градиента вместе с SVM используются для распознавания различных компонентов даты, таких как знаки препинания, цифры и сокращения. В конце строки помеченных компонентов ищет различные шаблоны дат. В целом этот метод дает положительные результаты, особенно с учетом того, что это первоначальная работа над рукописным многоязычным документом, в котором поля даты извлекаются автоматически. В будущих работах было бы полезно уменьшить ошибки сегментации на уровне слов и символов.

Чтобы получить лучшие результаты, подходы без сегментации на основе НММ могут исправить эти ошибки. Более того, такие методы могут улучшить уровень распознавания во всем. Использование единого метода извлечения признаков и классификатора поможет разработать лучшую систему с точки зрения простоты. Такие достижения расширят возможности поиска с помощью регулярных выражений. Таким образом, можно сделать вывод, что дальнейшие исследования могут быть направлены на достижение общих решений в анализе документов, а это означает, что применение автоматизации извлечения и распознавания полей дат может найти новые применения.

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 авторы не использовали генеративный ИИ.

Список литературы

- Ferrer M.A., Das A., Diaz M., Morales A., Carmona-Duarte C., Pal U. (2024). MDIW-13: a New Multi-Lingual and Multi-Script Database and Benchmark for Script Identification. *Cognitive Computation*, vol. 16, 131-157, <https://doi.org/10.1007/s12559-023-10193-w>.
- Fischer A., Frinken V., Bunke H., Suen C.Y. (2013). Improving hmm-based keyword spotting with character language models. *12th International Conference on Document Analysis and Recognition*, 506-510, <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2013.107>
- Gambella C., Ghaddar B., Naoum-Sawaya J. (2021). Optimization problems for machine learning: A survey. *European Journal of Operational Research*, vol. 290, 807–828, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.045>.
- Ghosh R., Vamshi C., Kumar P. (2019). RNN based online handwritten word recognition in Devanagari and Bengali scripts using horizontal zoning. *Pattern Recognition*, vol. 92, 203–218, <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2019.03.030>.
- Liang T., Poggio T., Rakhlin A., Stokes J. (2019). Fisher-Rao metric, geometry, and complexity of neural networks. In *Proceeding of the international conference on artificial intelligence and statistics*, vol. 89, 888–896, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.01530>.

- Littell P., Lo Ch., Larkin S., Stewart D. (2019). Multi-Source Transformer for Kazakh-Russian-English Neural Machine Translation. In Proceedings of the Fourth Conference on Machine Translation, vol. 2, 267–274, <https://doi.org/10.18653/v1/W19-5326>.
- Mandal R., Roy P., Pal U. (2012). Date field extraction in handwritten documents. 21st International Conference on Pattern Recognition (ICPR), 533-536, [doi:10.1109/ICDAR.2015.7333885](https://doi.org/10.1109/ICDAR.2015.7333885).
- Mandal R., Roy P., Pal U. (2012). Signature segmentation from machine printed documents using contextual information. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. – Vol. 26, <https://doi.org/10.1142/S0218001412530035>.
- Mandal R., Roy P.P., Pal U., Blumenstein M. (2015). Multi-lingual date field extraction for automatic document retrieval by machine. Information Sciences. – Vol. 314, 277-292, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.08.037>.
- Obaidullah S., Santosh K., Halder C., Das N., Roy K. (2019). Automatic Indic script identification from handwritten documents: page, block, line and word-level approach. Int. J. Mach Learn Cybern, vol. 10, 87-106, <https://doi.org/10.1007/s13042-017-0702-8>.
- Omayio E., Indu S., Panda J. (2023). Word spotting and character recognition of handwritten Hindi scripts by Integral Histogram of Oriented Displacement (IHOD) descriptor. Multimedia Tools and Applications, 1-30, <https://doi.org/10.1007/s11042-023-15219-x>.
- Ravi S., Khan A. M. (2013). Morphological Operations for Image Processing: Understanding and its Applications. Proc. 2nd National Conference on VLSI, Signal processing & Communications NCVSComs-2013.
- Rothacker L., Rusinol M., Fink G.A.(2013). Bag-of-features HMMs for segmentation-free word spotting in handwritten documents. 12th International Conference on Document Analysis and Recognition, 1305-1309, <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2013.264>.
- Roy K., Alaei A., Pal U. (2010). Word-wise handwritten Persian and Roman script identification. In Proceedings of the International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR), 628–633, <https://doi.org/10.1109/ICFHR.2010.103>.
- Roy P., Pal U., Lladós J., Delalandre M. (2012). Multi-Oriented Touching Text Character Segmentation in Graphical Documents using Dynamic Programming. Pattern Recognition, vol. 45, 1972-1983, <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2011.09.026>.
- Sakoe H., Chiba S. (1978). Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 26, 43-49, <https://doi.org/10.1109/TASSP.1978.1163055>
- Scheidl H., Fiel S., Sablatnig R.(2018). Word Beam Search: A Connectionist Temporal Classification Decoding Algorithm. 16th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR), 253-258, [doi: 10.1109/ICFHR-2018.2018.00052](https://doi.org/10.1109/ICFHR-2018.2018.00052).
- Spitz A.L. (1997). Determination of script, language content of document images. Patt. Recog., vol. 19, 235–245, [doi: 10.1109/34.584100](https://doi.org/10.1109/34.584100).
- Srivastava D., Harit G. (2020). Word Spotting in Cluttered Environment. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1024, 161–172, https://doi.org/10.1007/978-981-32-9291-8_14.
- Sushma S., Sharada B. (2024). Two-Stage Word Spotting Scheme for Historical Handwritten Devanagari Documents. In Data Analytics and Learning, vol. 779, 1–18, https://doi.org/10.1007/978-981-99-6346-1_1.

Information about authors

Sapuanov Birzhan – 2nd year doctoral student in Information systems, D. Serikbayev East Kazakhstan technical university, Oskemen, Kazakhstan, E-mail: birzhan.sapuanov@gmail.com, +7 778 690 73 25

Natalia Denissova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, East Kazakhstan Technical University, Oskemen, Kazakhstan, E-mail: NDenisova@ektu.kz

IT ЖАҢА ТРЕНДТЕРІ
НОВЫЕ ТРЕНДЫ IT
IT NEW TRENDS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_221
IRSTI 28.23.25; 14.15.15

**A.S. Tlebaldinova¹, S.K. Kumargazhanova², S.S. Smailova³, Zh.T. Konyrbayeva⁴,
Zh.M. Seitakhmetova⁵**

D. Serikbayev East-Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

¹E-mail: ATlebaldinova@edu.ektu.kz

²E-mail: SKumargazhanova@edu.ektu.kz*

³E-mail: SSmailova@edu.ektu.kz

⁴E-mail: ZhKonurbayeva@edu.ektu.kz

⁵E-mail: Seitahmetova_zh@ukk.nis.edu.kz

CLUSTER ANALYSIS OF BEHAVIORAL FACTORS IN THE FORMATION OF STUDENTS' DIGITAL IDENTITY

БІЛІМ АЛУШЫЛАРДЫҢ ЦИФРЛЫҚ СӘЙКЕСТІГІН ҚАЛЫПТАСТЫРУДАҒЫ МІНЕЗ-ҚҰЛЫҚ ФАКТОРЛАРЫН КЛАСТЕРЛІК ТАЛДАУ

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕДЕНЧЕСКИХ ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИИ ЦИФРОВОЙ ИДЕНТИЧНОСТИ ОБУЧАЮЩИХСЯ

Abstract. With the development of technology and the transition to online learning, ensuring the security of student data and their authentication in a digital environment are becoming important tasks for educational institutions. The purpose of the study is to use cluster analysis to analyze survey data in order to identify the features of students' digital identity. The general methodology of the study is presented, according to which preliminary data processing was carried out in order to prepare them for subsequent analysis. The paper uses hierarchical clustering using Ward's algorithm to analyze behavioral factors affecting the formation of students' digital identity. The study used survey data collected among 324 students from three regional universities of the Republic of Kazakhstan. The content of the questions includes digital activity and interaction of students in the online space, as well as questions about their academic, research and social activities. The Cronbach's α coefficient was used to assess the reliability and reliability of the data. As a result of the study, groups of students with different levels of digital identity ("Intensive digital activity", "Hybrid form of digital activity", "Limited digital activity").

Keywords: digital identity, survey data, hierarchical clustering, digital activity, academic activity, research activity, social activity.

Аңдатпа. Технологиялардың даму қарқынына және онлайн оқытуға көшуге байланысты студенттер деректерінің қауіпсіздігін қамтамасыз ету және оларды цифрлық ортада аутентификациялау сияқты мәселелер білім беру мекемелері үшін маңызды міндеттерге айналды. Зерттеудің мақсаты – білім алушылардың цифрлық сәйкестіктерінің ерекшеліктерін анықтау мақсатында сауалнама деректерін талдау үшін кластерлік талдауды қолдану. Зерттеудің жалпы әдістемесі ұсынылған, оған сәйкес оларды кейінгі талдауға дайындау мақсатында деректерге алдын ала өңдеу операциялары жүргізілді. Жұмыста студенттердің цифрлық сәйкестігін қалыптастыруға әсер ететін мінез-құлық факторларын талдау үшін Ward алгоритмі арқылы иерархиялық кластерлеу қолданылды. Зерттеу барысында Қазақстан Республикасының үш өңірлік жоғары оқу орындарынан 324 студент арасында жиналған сауалнама деректері пайдаланылды. Сұрақтардың мазмұны цифрлық белсенділікті және онлайн-кеңістіктегі білім алушылардың өзара іс-қимылын, сондай-ақ олардың академиялық, зерттеу және өлеуметтік белсенділігі туралы сұрақтарды қамтиды. Деректердің сенімділігін бағалау үшін α Кронбах коэффициенті қолданылды. Зерттеу нәтижесінде білім алушылардың цифрлық сәйкестіктерінің әртүрлі деңгейлерін қамтитын («Қарқынды цифрлық белсенділік», «Цифрлық белсенділіктің гибриді түрі», «Шектеулі цифрлық белсенділік») топтар бөлінді.

Түйін сөздер: цифрлық сәйкестілік, сауалнама деректері, иерархиялық кластерлеу, цифрлық белсенділік, академиялық қызмет, зерттеу қызметі, әлеуметтік қызмет.

Аннотация. С развитием технологий и переходом к онлайн-обучению, обеспечение безопасности данных студентов и их аутентификация в цифровой среде становятся важными задачами для образовательных учреждений. Цель исследования заключается в применении кластерного анализа для анализа опросных данных с целью выявления особенностей цифровой идентичности обучающихся. Представлена общая методология исследования, согласно которой была проведена предварительная обработка данных с целью их подготовки для последующего анализа. В работе была использована иерархическая кластеризация по алгоритму Ward для анализа поведенческих факторов, влияющих на формирование цифровой идентичности студентов. В исследовании были использованы опросные данные, собранные среди 324 студентов из трех региональных вузов Республики Казахстан. Содержание вопросов включает в себя цифровую активность и взаимодействие обучающихся в онлайн-пространстве, а также вопросы об их академической, исследовательской и социальной активности. Для оценки достоверности и надежности данных был использован коэффициент α Кронбаха. В результате исследования были выделены группы обучающихся с различным уровнем цифровой идентичности («Интенсивная цифровая активность», «Гибридная форма цифровой активности», «Ограниченная цифровая активность»).

Ключевые слова: цифровая идентичность, данные опроса, иерархическая кластеризация, цифровая активность, академическая деятельность, исследовательская деятельность, социальная активность

Introduction. In our information age, permeated by the rapid development of digital technologies, the digital identity of students is becoming an integral part of their social life and academic activities.

This study focuses on identifying the features of the digital identity of students of regional universities in East Kazakhstan, taking into account their academic, scientific and social activities. The analysis of these aspects will provide a better understanding of how students interact with digital technologies and information as part of their learning, research, and social interactions in the learning environment, which can then be used to analyze students' behavioral and preferred characteristics in an online environment. This will help them identify their digital identity in the context of developing a digital profile and identify educational needs and weaknesses, which in turn will allow them to create a personalized learning trajectory in the future.

In this regard, the purpose of this study is to use cluster analysis to analyze survey data in order to identify the features of students' digital identity.

The methodology and analysis were based on the following research questions: What behavioral factors have a significant impact on the formation and expression of students' digital identity? How can these factors be identified and systematized using cluster analysis methods based on online survey data?

The structure of the article is presented as follows: Section 1 contains an analysis of previous studies, section 2 describes the methodology, including the stages of data collection and pre-processing, as well as the application of cluster analysis. Section 3 includes a description of the course and results of the study, as well as a discussion of the results obtained.

1 Overview of previous works. In recent years, digital identity has become a key aspect of modern life, especially in the context of education and online interactions. A review of scientific papers on the definition of this concept reveals a variety of approaches and concepts used by researchers. For example, identity, without specifying it as "digital", describes a set of personality characteristics that help distinguish one person from others (Kovaleva, 2019). This process of identity formation is closely related to social interaction and depends on social norms and practices (Tomlinson & Jackson, 2021, Batool & Ghayas, 2020). In today's world, people

are spending more and more time in an online environment that constantly generates a huge amount of content. This encourages us to consider the concept of identity in the digital space as well. Thus, the concept of digital identity arises, defined in (Korać, Damjanović & Simić, 2022, Borrás-Gené, Serrano-Luján & Díez, 2022, Moskovskaya & Perova, 2022, Feher, 2021) as the relationship between a person's self-perception and the identity formed by them and other participants in the online space.

Of course, the issue of the formation and development of digital identity is an integral part of modern education and society as a whole. Understanding and taking into account the peculiarities of digital identity helps to effectively integrate digital tools into the educational process, creating conditions for successful personal development and preparation for a future career in the digital age (Borrás-Gené, Serrano-Luján & Díez, 2022, Borrás-Gené & Blázquez-Sevilla, 2020, González, 2024, Hernández-Orellana, Pérez-Garcias & Roco-Videla, 2021, Muslov, 2023). In turn, one of such tools described in (Borrás-Gené, Serrano-Luján & Díez, 2022) is the self-reflection tool "Digital Identity Analysis Canvas". It is designed to raise students' awareness of the importance of their digital identity. The purpose of creating this tool is to analyze the student's digital footprint on the web, that is, his online activities, which will subsequently serve as a starting point for providing recommendations on the competent management of his professional digital identity. The canvas structure includes five blocks: Activity, Community, Focus, Privacy, Communication. The basis for the creation of this tool is an online questionnaire, which consists of two blocks: 1 block - "Student activity in digital social networks" (5 questions), 2 block – "Use of other educational digital networks and platforms" (15 questions). The content of the questions covers the reflection of the student's digital identity, his perception of his own online presence as a digital resume and its impact on job search, as well as the level of interest in actively managing his professional digital identity.

Research based on the analysis of online survey data is also conducted in order to study the characteristics of students' academic digital identity (Hernández-Orellana, Pérez-Garcias & Roco-Videla, 2021). The authors propose, based on the identification of the characteristics of the academic digital identity of students, to redefine their learning space, which allows integrating all those technological tools that the student actually uses. The sample consisted of 509 students who voluntarily filled out an online questionnaire. To identify the characteristics, a conglomerate analysis was performed using a hierarchical dissociative method.

According to recent studies, the study of students' digital identity problems is usually limited to analyzing only one aspect, which does not always allow us to fully understand their diverse online activity. The present study attempts to eliminate this shortcoming by expanding the analysis to behavioral factors related not only to the academic, but also to the research and social spheres of students.

2 Methodology. The general scheme of the research methodology is shown in Figure 1.

As can be seen, the proposed research methodology consists of three main stages:

- data collection.
- pre-processing of data;
- data processing (cluster analysis).

A more detailed description of each stage is provided below.

2.1 Data collection. As you know, the digital identity of a student includes various aspects covering academic, research and social spheres of activity. To implement the student's Digital Profile service, a survey was conducted among students. The survey included questions related to each of these areas.

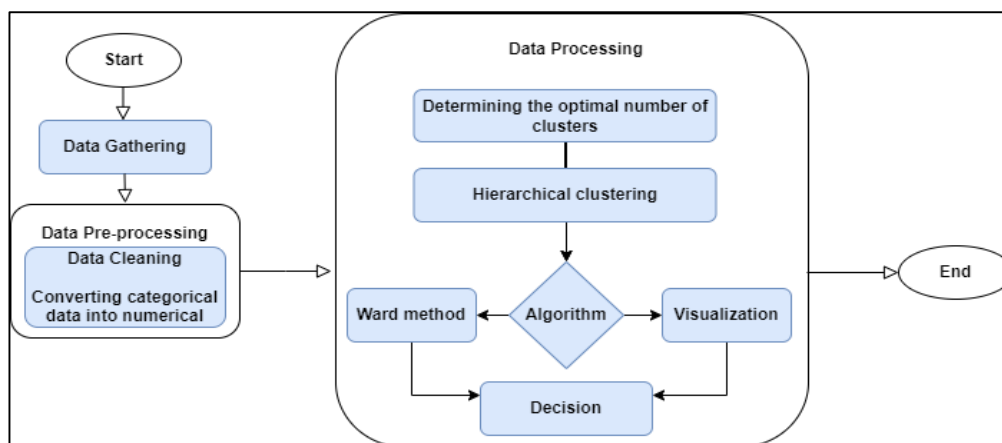


Figure 1. General scheme of research methodology

Note – compiled by the authors

The survey was conducted online via a Google form. 324 people from three regional universities of the Republic of Kazakhstan took part in the survey: D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, S. Amanzholov East Kazakhstan University and the Kazakh-American Free University. There are 203 men and 121 women among the participants. The survey questions were previously tested for reliability and validity with ten experts in the field of digitalization of education and IT employees of enterprises. The results were analyzed in order to assess reliability using the Cronbach's a statistical method (Muslov, 2023), which showed a coefficient of 0.85. This indicates a fairly high reliability of the internal consistency of the survey data.

The survey consisted of 27 questions divided into four blocks: general questions (G) – 4, questions on digital activity and interaction in the online space (D) – 7, questions on academic activity (A) – 6, questions on research activity (R) – 6 and on social activity (S) – 4. The basic design of the study is presented in Table 1.

Table 1. The basic design of the study and the corresponding tags of the survey questions

Question tag	G	D	A	R	Question tag	D	A	R	S
Sex	+				Degree of engagement in DLE			+	
Age	+				Desire to engage in research			+	
Specialty/Position	+				Assessment of DLE			+	
University/Company	+				Motivation for participation in DLE			+	
Virtuality degree		+			Form/type of participation in DLE			+	
Preferred environment		+			Online learning platforms		+		
Communication preferences		+			Educational resources offered by the university		+		
Internet activity		+			Protection of educational achievements on educational platforms		+		
Learning resources			+		Additional source of knowledge		+		
Social activity		+			Recognition of non-formal learning outcomes		+		
Online privacy		+			Participation in student events				+
Awareness digital security		+			Membership in student organization				+
Benefits of participating in DLE				+	Participation in university sports events				+
					Preferred university events				+

Note – compiled by the authors

Determining the main characteristics of a student's digital identity is based on the analysis of various types of questions in the questionnaire, such as open, closed, Likert scale and multiple-choice questions.

2.2 Pre-processing of data. Pre-processing of data after collecting survey materials is a necessary and important step (Naseem, Razzak & Eklund, 2021). The purpose of these activities is to prepare data for subsequent analysis and application of machine learning algorithms. To begin with, work has been done on data cleaning and preprocessing. This stage included deleting or filling in missing values, processing outliers, and converting categorical data to numeric values using the Label Encoding method. Label Encoding is a method of categorical data conversion in which each unique category is assigned a unique integer value. The advantage of Label Encoding is that it is easy to use and can be effective if there is a certain order between the categories (Dahouda & Joe, 2021). At the final stage of preliminary data processing, the aggregation of identical responses of respondents for each question was carried out. Thus, the data was prepared for subsequent analysis and application of machine learning algorithms. All data processing operations were implemented using the R programming language.

2.3 Applying cluster analysis. Cluster data analysis (or clustering) is a data analysis method that aims to divide a dataset into groups, or clusters, so that objects within one cluster are more similar to each other than to objects from other clusters (Sari, Al-Khowarizmi & Batubara, 2021, Wójcik et al., 2021, Shahapure & Nicholas, 2020). The purpose of cluster analysis is to identify the internal structure in the data and identify natural groups of objects that have similar characteristics or behavior in the provided dataset.

In general, many clustering algorithms can be divided into iterative and hierarchical ones.

Iterative clustering methods are effective if the number of segments is known in advance. These algorithms recalculate the distance matrix at each stage until all objects are assigned to their clusters. Centroids, representing typical and central examples of each cluster, are formed during this method.

Hierarchical methods, on the contrary, consistently recalculate the distances between all objects, combining them into clusters on the dendrogram. These methods are suitable for situations where the number of groups is unknown in advance, which is relevant for our case.

In this study, the Euclidean distance is used as a measure of the similarity of observations. The distances between clusters are calculated using the Ward method (Sharma et al., 2019, Randriamihamison, Vialaneix & Neuvial, 2021).

The Ward method. Let the partition of the set V be understood as a set of elements represented in the form

$$K = \{V_1, \dots, V_i, \dots, V_N\}, \quad (1)$$

where N is the number of clusters, V_N – and V_n is the set of vertices that make up the cluster with number k , $k = 1, \dots, N$. The objective function for K is defined as the sum of the intracluster variances:

$$Z(K) = \sum_{i=1}^N \sum_{j \in V_i} d^2(j, z_i), \quad (2)$$

where i – cluster number, z_i – the center of cluster i .

This division is formed from K when two clusters with numbers $i_1, i_2 \in \{1, \dots, N\}$, $i_1 \neq i_2$, are combined by (i_1, i_2) ; let

$$\Delta(i_1, i_2) := Z(K(i_1, i_2)) - Z(K). \quad (3)$$

looking at all pairs $i_1, i_2 \in \{1, \dots, N\}$, $i_1 \neq i_2$, we find numbers i_1^* and i_2^* such that

$$\Delta(i_1^*, i_2^*) = \min_{i_1, i_2 \in \{1, \dots, N\}} \Delta(i_1, i_2). \quad (4)$$

Therefore, the Ward method does not know the number of clusters in advance.

In the Ward method, the increase in the sum of squared distances of objects to cluster centers is measured as a result of combining them.

This method seeks to minimize the variance within clusters at each step of hierarchical clustering.

Next, the nearest clusters are sequentially combined to minimize the increase in the sum of squared distances. At each step of the algorithm, objects are grouped into clusters, and then the distances between clusters are recalculated. This process is repeated until the specified number of clusters is reached or until a satisfactory clustering structure is obtained. Thus, the Ward method is focused on forming compact and homogeneous clusters in the data.

3 Results and discussion. As a result of the preprocessing stage, the total number of observations was 135. Before applying cluster analysis, the optimal choice of the number of clusters was made using the Elbow method, since the number of clusters in the Ward method is unknown in advance.

The Elbow method is a graphical method that is used to determine the optimal number of clusters in cluster data analysis. The name of the method comes from its visual interpretation, where a curve resembling an elbow on the arm is formed on the graph of the dependence of the sum of squares of distances from points to cluster centroids on the number of clusters. The optimal number of clusters is selected based on this bend - the point after which the decrease in the sum of squared distances becomes less significant, and changes in the data become more gradual (Liu & Deng, 2021). Thus, as can be seen in Figure 2, the greatest decrease in the steepness of the curve is observed at a value of 3.

For better visualization of the data structure, in addition to the dendrogram, a phylogenetic tree of hierarchical clustering was constructed (see Figure 3). The results clearly demonstrate a clear division between clusters, and their mutual disjointment emphasizes the pronounced structure and uniformity of data within each cluster. This highlights the effectiveness of the analysis performed by clearly identifying different groups in the data set under consideration.

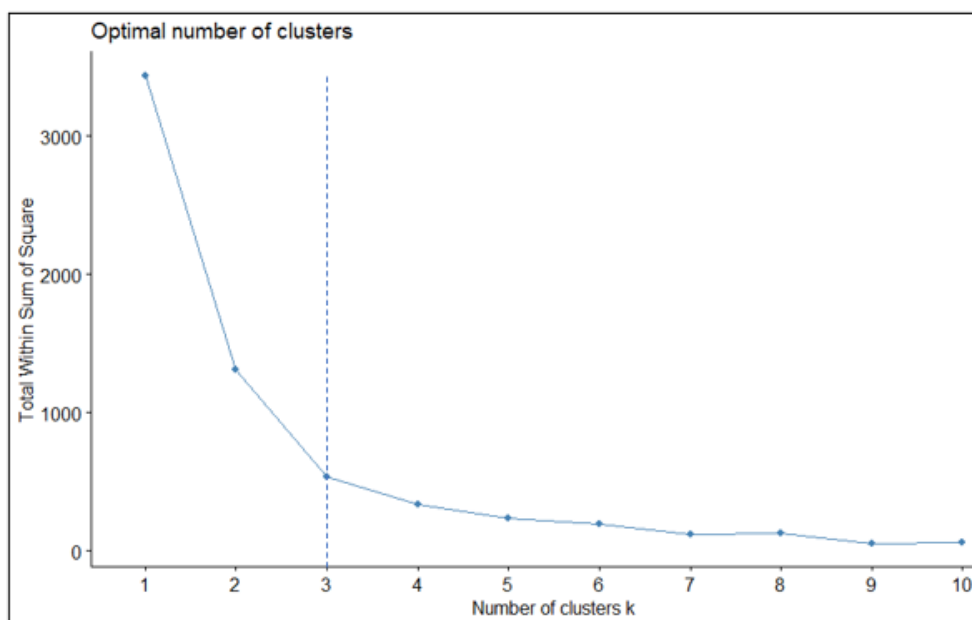
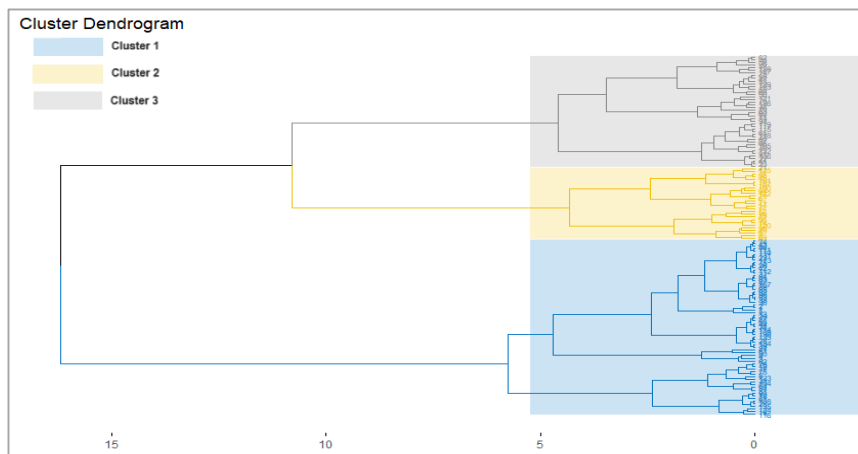


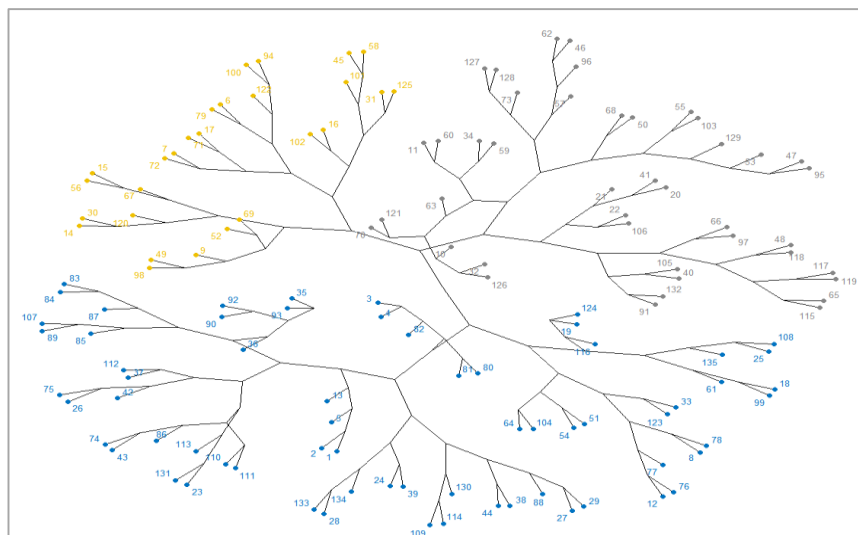
Figure 2. Optimal number of clusters

Note – compiled by the authors

The analysis of the obtained clusters shows that the students of the first (blue) cluster (66 observations) demonstrate a high digital identity, showing comfort in a virtual environment. They prefer online communication, use a variety of digital platforms, and show a preference for written digital communication. Their interests on the Internet are diverse – from educational to professional. The flexibility in learning is reflected in the use of various online resources. The perception of scientific activity as prestigious indicates a desire for academic growth. Participation in various forms of scientific activity, startups and conferences emphasizes their active digital scientific component. Students also show a wide interest in the university environment, using digital resources in student organizations and educational events. In general, the digital identity of students in this cluster is characterized by confidence and comfort in a virtual environment, active use of digital technologies in teaching and a wide range of interests in the online space, while combining them with active social and educational activities in real life.



a) Dendrogram



b) Phylogenetic tree

Figure 3. a, b – Results of cluster analysis using hierarchical clustering

Note – compiled by the authors

The students of the second (yellow) cluster (27 observations) prefer a hybrid environment, combining real and virtual space. They prefer live conversation and use the Internet to search for information and entertainment. Messengers and educational platforms are actively used in training. They are aware of their digital footprint and evaluate scientific activities, although they participate in it only in a limited way. They prefer sports activity outside the university and do not show interest in university events. In general, they show flexibility in digital technologies, but prefer more individual forms of activity and limited participation in scientific activities.

The analysis of the digital identity of students in the third (gray) cluster (42 observations) allows us to identify key characteristics. Students show a preference for relaxed digital communication through text messages and the phone, indicating the multidimensional use of the Internet for study, entertainment and mood maintenance. However, limited awareness of the digital footprint and ignorance of the relevant term indicate a lack of awareness of digital security. A negative attitude towards scientific activity is accompanied by pragmatic motives for participation, while the assessment of the prestige of research is multidirectional. The training mainly takes place through official documentation and communication with classmates. Dissatisfaction with the protection of academic achievements on educational platforms may reflect a perception of injustice. Academic activities remain a priority, although students recognize the importance of student life by showing interest in creative and scientific events at the university.

A thorough analysis of the clusters made it possible to identify the main characteristics of the digital identity of students in the context of their digital, academic, scientific and social activities. Summary characteristics of each cluster are presented in Table 2.

The results of the cluster analysis evaluation allow us to conclude that the largest cluster, cluster 1, can be characterized as "Intensive Digital Activity". Participants in this cluster show a high level of involvement in digital practices in various fields, including academic, scientific and social activities. Cluster 2, in turn, is a "Hybrid form of Digital Activity". In this group, participants combine different aspects of digital activity, maintaining a balance between traditional and digital forms of interaction. Finally, Cluster 3 is described as "Limited Digital Activity". Participants in this cluster show a more limited interest in digital practices, preferring more traditional ways of interacting. These characteristics not only help in understanding the digital activity of different groups of participants, but also provide a basis for further research and development of appropriate support strategies in the context of the digital environment.

Table 2. Summary characteristics of clusters

Behavioral factors of students	Characteristics	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3
Digital activity				
Online activity	the Degree of similarity between the real and the virtual "I"	all the values of the scale	-	-
	Preferred medium of expression of oneself	virtual	hybrid	-
	Preferred method of discussion of important topics	email, video conference	live conversation	text messages, phone call

	The purpose of the Internet visit	Diverse interests	to search for information and entertainment	for studying and cheering up
	The frequency of the information exchange in the network	-	nothing puts	Posts regularly
the Academic activity				
Digital educational preferences	Used digital educational platforms and other online services for learning	different sites	only educational platform	social network forums
Digital security	Awareness of the security of educational achievements on educational platforms	difficult to answer	yes	no
	knowledge of the articulation of the results of informal education	-	yes	no
	Awareness about digital footprint	difficult to answer	yes	no
Research activity				
Involvement in the scientific community in the digital space,	Level of involvement in scientific research	Participated several times	Never participated	Participated once
	Desire to engage in research work (SRW)	Yes	Yes	no, I'm not doing research but perhaps it would be interesting
	Shape/form of participation in research	in startups, in conferences, in scientific circles	in contests/competitions	-
	Reason of participating in SRA	opportunity to make new important contacts	additional benefits for employment, the possibility of a successful defense of the thesis (project)	more chances to enter a master/doctoral program
Social activity program				
Social activity in the digital space	Participation in student events	yes	can definitely do it if you want, don't think it's necessary to participate everywhere	no. The main purpose of visiting the university is to study and gain knowledge

	Membership in student organizations	consist	not consist	consist
	Attending various university events	have not yet participated, but in the near future I think I will	no, I have not attended	various events
	Sports activity	yes, I am a member of one of the national teams of the university	I play sports outside university walls	I am far from sports
<i>Note – compiled by the authors</i>				

Conclusions. The results of the study allowed us to identify different groups of students with different levels of digital identity. The study of the influence of behavioral factors on the processes of formation and expression of digital identity among students has led to interesting conclusions about the relationship between individual preferences and the use of digital technologies. The results of the study emphasize the importance of taking this relationship into account when developing teaching methods, as well as integrating digital tools into the learning process. Based on the conducted research, it is proposed to develop a digital profile of the student, taking into account his level of digital identity, as well as planning personalized learning trajectories in order to optimize their academic and social development.

Acknowledgements. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under the grant financing program for the 2023-2025 years by the program AP19680002 «Student's digital identity formation methodology in the circuit continuing education of universities of the Republic of Kazakhstan».

Список литературы

- Ковалева А.И. Разновидности социальной идентичности: подходы к классификации. – 2019. – № 4. – С. 89-103. <https://doi.org/10.17805/zpu.2019.4.7> // Kovaleva A.I. Raznovidnosti sotsial'noy identichnosti: podkhody k klassifikatsii. Sotsiologiya i zhizn'. 2019. – № 4. – С. 89-103. <https://doi.org/10.17805/zpu.2019.4.7>
- Tomlinson M., Jackson D. Professional identity formation in contemporary higher education students. *Studies in Higher Education*. – 2021. – Т. 46. – №. 4. – С. 885-900.
- Batool S. S., Ghayas S. Process of career identity formation among adolescents: components and factors. *Heliyon*. – 2020. – Т. 6. – №. 9.
- Korać D., Damjanović B., Simić D. A model of digital identity for better information security in e-learning systems. *The Journal of Supercomputing*. – 2022. – С. 1-30.
- Borrás-Gené O., Serrano-Luján L., Díez R.M. Professional and Academic Digital Identity Workshop for Higher Education Students. *Information* 2022, 13, 490. <https://doi.org/10.3390/info13100490>
- Московская Н.Л., Перова Е.А. Формирование цифровой идентичности обучающегося в контексте аутентичной педагогики иноязычного образования. *Вестник Северо-Кавказского федерального университета*. 2022. – № 6 (93). – С. 120-127. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2022.6.14> // Moskovskaya N.L., Perova E.A. Formation of a student's digital identity in the context of authentic pedagogy of foreign language education. *Bulletin of the North Caucasus Federal University*, 2022, №6 (93), p.120-127. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2022.6.14>
- Feher K. Digital identity and the online self: Footprint strategies – An exploratory and comparative research study. *Journal of Information Science*, 2021, 47(2), 192-205. <https://doi.org/10.1177/0165551519879702>
- Borrás-Gené O., Blázquez-Sevilla A. Apuntes para El Taller de Identidad Digital 2020 #idUPM. Presented at the Taller de Identidad Digital, Madrid. 2020.

- González D. Canvas de identidad digital. Diana González. 10.04.2024. Available online: <https://dianagonzalezgonzalez.com/canvas-identidad-digital>
- Hernández-Orellana M., Pérez-Garcías A., Roco-Videla Á. Characterization of the Digital Identity of Chilean University Students Considering Their Personal Learning Environments. *Future Internet* 2021, 13, 74. <https://doi.org/10.3390/fi13030074>
- Муслов С.А. Вычисление α Кронбаха при тестировании и опросах по исследованию качества жизни на занятиях по статистике в медицинских вузах. Сб. материалов XI Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и мирового сообщества в эпоху цифровизации». – Москва, 2023. – С. 651-657. // Muslov S. A. Calculation α of the Cronbach's conjecture in testing and surveys on the study of quality of life in statistics classes in medical universities. Collection of materials of the XI International Scientific and Practical Conference "Modern trends in the development of science and the world community in the era of digitalization". Moscow, 2023, pp. 651-657.
- Naseem U., Razzak I. & Eklund P.W. A survey of pre-processing techniques to improve short-text quality: a case study on hate speech detection on twitter. *Multimed Tools Appl* 80, 35239–35266 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10082-6>
- M.K. Dahouda and I. Joe. A Deep-Learned Embedding Technique for Categorical Features Encoding in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 114381-114391, 2021, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3104357>.
- I.P. Sari, Al-Khowarizmi, I. H. Batubara. Cluster Analysis Using K-Means Algorithm and Fuzzy C-Means Clustering for Grouping Students' Abilities in Online Learning Process. *Journal of Computer Science, Information Technology and Telecommunication Engineering (JCoSITTE)*. – Vol. 2. – No. 1, March 2021. – Pp. 139-144. <https://doi.org/10.30596/jcositte.v2i1.6504>
- Wójcik W., Karmenova M., Smailova S., Tiebaldinova A., Belbeubaev A. Development of data-mining technique for seismic vulnerability assessment. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 2021. – Vol. 67. – No. 2. – Pp. 261-266, DOI: 10.24425/ijet.2021.135974
- K.R. Shahapure and C. Nicholas. Cluster Quality Analysis Using Silhouette Score, 2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA), Sydney, NSW, Australia, 2020, pp. 747-748, doi: 10.1109/DSAA49011.2020.00096.
- Sharma S. et al. Comparative study of single linkage, complete linkage, and ward method of agglomerative clustering. 2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon). – IEEE, 2019. – С. 568-573.
- Randriamihison N., Vialaneix N. & Neuvial P. Applicability and Interpretability of Ward's Hierarchical Agglomerative Clustering With or Without Contiguity Constraints. *J Classif* 38, 363–389 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00357-020-09377-y>
- F. Liu and Y. Deng. Determine the Number of Unknown Targets in Open World Based on Elbow Method. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. – Vol. 29. – No. 5. – Pp. 986-995, May 2021, <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2020.2966182>.

Information about authors

Tiebaldinova Aizhan Soltangaliyevna – PhD, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, ATiebaldinova@edu.ektu.kz, +77057521522

Kumargazhanova Saule Kumargazhanovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan saule.kumargazhanova@edu.ektu.kz, +77771839377

Smailova Saule Sansyzbaevna – PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, ssmailova@edu.ektu.kz, +77771839752

Konurbayeva Zhadyra Tusuphanovna – Candidate of Economic Sciences, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, ZhKonurbayeva@edu.ektu.kz, +77771827250

Seitahmetova Zhanat Maratovna – PhD, D. Serikbayev East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan, seitahmetova_zh@ukk.nis.edu.kz, +77053152123

АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР
ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ
INFORMATION SYSTEMS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_232
MFTAA 28.23.29

И.М. Увалиева¹, Ш.Т. Тезекпаева², Д.Р. Борозенец³, Ұ. Қалымбек⁴

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

¹E-mail: iuvalieva@ektu.kz*

²E-mail: shtezekpaeva@edu.ektu.kz

³E-mail: borozenets.david.sh4@yandex.kz

⁴E-mail: kalimbek.ulan@gmail.com

**ДЕНСАУЛЫҚ ПАСПОРТЫ БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ЖҮЙЕСІНІҢ ЕСЕПТЕУ-АНАЛИТИКАЛЫҚ
МОДУЛЬДЕРІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИХ
МОДУЛЕЙ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ПАСПОРТА ЗДОРОВЬЯ**

**EXPERIMENTAL STUDY OF COMPUTATIONAL AND ANALYTICAL MODULES OF THE
HEALTH PASSPORT SOFTWARE SYSTEM**

Аңдатпа. Мақалада зертханалық зерттеулердің деректерін өңдеуді автоматтандыруға, клиникалық-гематологиялық синдромдарды диагностикалауға және дәстүрлі әдістерді де, жасанды интеллектті де қолдана отырып пациенттерді басқаруға арналған инновациялық шешім болып табылатын денсаулық паспортының бағдарламалық кешенінің есептеу-аналитикалық модульдері сипатталған. Жүйе клиникалық-гематологиялық синдромдарды тиімді диагностикалауға және диагностиканың дәлдігін жақсартуға мүмкіндік беретін медициналық ақпаратты жинауға, өңдеуге және талдауға арналған әртүрлі модульдерді қамтиды. Кешеннің негізгі компоненттеріне мәліметтер базасымен жұмыс істеуге, деректерді өңдеуге және математикалық өңдеуге арналған модульдер, сондай-ақ морфологиялық жіктеуге және машиналық оқытуды қолдануға арналған аналитикалық модульдер кіреді. Кешенді енгізу клиникалық-диагностикалық орталықтарда, зертханаларда және ауруханаларда медициналық қызметтердің сапасын едәуір жақсартуға ықпал етеді.

Түйін сөздер: денсаулық паспорты, клиникалық шешімдерді қолдау, медициналық деректерді талдау, медициналық диагностика, клиникалық-гематологиялық синдром, аналитикалық модуль, машиналық оқыту алгоритмі.

Аннотация. В статье описаны вычислительно-аналитические модули программного комплекса паспорта здоровья, который представляет собой инновационное решение для автоматизации обработки данных лабораторных исследований, диагностики клинко-гематологических синдромов и управления пациентами с применением как традиционных методик, так и искусственного интеллекта. Система включает различные модули для сбора, обработки и анализа медицинской информации, что позволяет эффективно диагностировать клинко-гематологические синдромы и улучшить точность диагностики. Основные компоненты комплекса включают модули для работы с базой данных, предобработки и математической обработки данных, а также аналитические модули для морфологической классификации и применения машинного обучения. Внедрение комплекса способствует значительному улучшению качества медицинских услуг в клинко-диагностических центрах, лабораториях и больницах.

Ключевые слова: паспорт здоровья, поддержка клинических решений, анализ медицинских данных, медицинская диагностика, клинко-гематологический синдром, аналитический модуль, алгоритм машинного обучения.

Abstract. The article describes the computational and analytical modules of the Health Passport software system, which is an innovative solution for automating data processing of laboratory tests, diagnosis of clinical and hematologic syndromes and patient management using both traditional

techniques and artificial intelligence. The system includes various modules for collecting, processing and analyzing medical information, which allows to efficiently diagnose clinical and hematological syndromes and improve diagnostic accuracy. The main components of the complex include modules for working with the database, preprocessing and mathematical data processing, as well as analytical modules for morphological classification and application of machine learning. Implementation of the complex contributes to a significant improvement in the quality of medical services in clinical diagnostic centers, laboratories and hospitals.

Keywords: *health passport, clinical decision support, medical data analysis, medical diagnosis, clinical hematologic syndrome, analytical module, machine learning algorithm.*

Kipicne. Денсаулық паспортының бағдарламалық кешені зертханалық зерттеулердің деректерін дәстүрлі әдістер мен жасанды интеллект көмегімен өңдеуге, пациенттің анемиясын диагностикалауға және деректерді жеке карточкаға сақтауға, емдеуші дәрігер тарапынан пациенттерді басқаруға арналған.

Денсаулық паспортының бағдарламалық кешені HTTP протоколы бойынша қойылатын талаптарға сәйкес Дереккордың мазмұнын басқаруға арналған Web-интерфейсті ұсынады. Қолдану саласы: клиникалық-диагностикалық орталықтар мен зертханалар, ауруханалар, медициналық зертханалар, медициналық ақпараттық жүйелер бағыты бойынша мамандар даярлайтын жоғары оқу орындары.

Денсаулық паспортының бағдарламалық кешені тиімділікті, жылдамдықты және дәлдікті арттыруға, сондай-ақ дәстүрлі әдістерді жасанды интеллект құралдарымен біріктірудің арқасында клиникалық-гематологиялық синдромдарды (КГС) анықтауды автоматтандыруға мүмкіндік береді. Бұл зерттеу Қазақстан Республикасындағы денсаулық сақтауды цифрландыру жөніндегі ауқымды жобаның негізгі бағыттарына сәйкес келеді (Kazakhstan 2050 (Назарбаев, 2012), eHealth, Digital Kazakhstan, электрондық денсаулық паспорты (ЭДС) (Акулин и др., 2022). Зерттеу ұлттық денсаулық сақтау жүйесі аясында жасанды интеллектті қолдана отырып, клиникалық шешімдерді қолдау жүйесін әзірлеуге және енгізуге бағытталған.

Денсаулық паспортын енгізу экономиканы қалпына келтіру құралы ретінде қызмет етеді, Бизнесінің қауіпсіз ашылуына және адамдардың жұмыс орындарына оралуына көмектеседі, инфекцияның таралу қаупін азайтады (Ambalavanan et al., 2024). Яғни, денсаулық паспорты қазіргі пандемияға жауап ретінде де, болашақта осындай дағдарыстардың алдын алу үшін де қоғамдық денсаулықты қамтамасыз етудің маңызды элементіне айналады (Ismukhamedova, Uvaliyeva & Belginova, 2024).

(Мищенко и др., 2021) зерттеуінде оқу орындарына электрондық денсаулық паспортын енгізу процесі сипатталған. Бұл жүйені білім беру процесіне біріктірудің практикалық аспектілеріне, сондай-ақ оның студенттер мен оқу орындарының қызметкерлерінің денсаулығын бақылау үшін маңыздылығына назар аударылады.

(Soh, Rosdy & Sabriet, 2023) зерттеу авторлары дәрігерлерге, зерттеушілерге және пациенттерге пайдалы болуы мүмкін пациенттің стоматологиялық денсаулығы туралы ақпаратты жинақтау мен жүйелеудің маңыздылығына назар аударады. Бұл әсіресе жаһандану жағдайында пациенттер әртүрлі елдердегі мамандарға жүгінуге мәжбүр болған кезде өте маңызды. (Hennessy, Nash & Donohue, 2024) зерттеу ауыр психикалық ауытқулары бар науқастардың физикалық денсаулығына жеткіліксіз назар аудару мәселесін сипаттайды.

Қазақстанның тұрақты болашақ дамуын қамтамасыз етудің негізгі факторы ретінде цифрландыруға, ғылымға және инновацияларға кешенді көзқарастың маңыздылығына (Айтбаева, Токатова & Маханбетова, 2023) мақалада баса назар аударылады. Автор Қазақстанның Орталық Азиядағы цифрлық технологиялар мен инновациялық шешімдер саласындағы көшбасшылардың бірі болуға әлеуеті бар екенін атап көрсетеді. Автор

(Towett, Snead, Grigoryan & Marczika, 2023) халықаралық деңгейде COVID-19 пандемиясын басқару үшін цифрлық денсаулық паспорттарын енгізуге қатысты мәселелерді қарастырады.

Материалдар мен зерттеу әдістері. Бағдарламалық жасақтама кешенінің есептеу-аналитикалық модульдері келесі функцияларды орындауға мүмкіндік береді: пациенттің өзін-өзі диагностикалауға және өзінің медициналық картасын қарауға қол жеткізуін, оған емдеуші дәрігердің қол жеткізуін қамтамасыз ету; дәрігердің пайдаланушы сұранысы бойынша пациенттердің статистикасын біріктіру; диагностика үшін деректер жиынтығын орталықтандырылған жинау, қол жеткізу және басқару; деректерді өңдеу, тазарту және оңтайландыру; ауру көрсеткіштерін математикалық модельдеу; индикаторлар негізінде аурудың морфологиялық жіктелуі; графикалық интерфейсін көмегімен диагностиканы нақтылау үшін машиналық оқыту ансамбльдерін құруы және қолдануы; графикалық интерфейсін қолдана отырып, диагностика кезінде жасырын заңдылықтарды табу үшін нейрондық желілердің архитектуралары мен гиперпараметрлерін құру.

а) Медициналық деректерге қол жетімділікті эксперименттік зерттеу. Пациенттің өзін-өзі диагностикалауға және өзінің медициналық картасын қарауға қол жеткізуі, оған емдеуші дәрігердің қол жеткізуі. Бұл модульдің функционалдығы мыналарды қамтиды: пациенттің өзі немесе зертханашы зертханалық диагностиканың бастапқы деректерін енгізуге арналған интерфейс; пациенттің диагностикасының нәтижелері мен тарихын қарау; дәрігердің пациенттің картасын іздеуі және демографиялық мәліметтермен қатар диагностика тарихын қарау; диагноздарды дерекқорға сақтау және жою мүмкіндігі.

1-суретте демографиялық және медициналық деректері бар пациенттің картасы көрсетілген. Жоғарғы бөлігінде науқастың деректері көрсетілген: аты, тегі, жынысы (әйел), және туған жылы. Содан кейін бірнеше диагноз қойылған карталар көрсетіледі. Әрбір картада қан көрсеткіштері (гемоглобин, гематокрит, эритроциттер, В12, және т.б.), қан индекстері (МСН, МСНС, МСV), сондай-ақ талдау нәтижелері бар, мысалы: «анемия жоқ» немесе «Микроциттік тип».

История диагнозов

Имя: **Адилова**
 Диагнозы пациента Adilova Madina

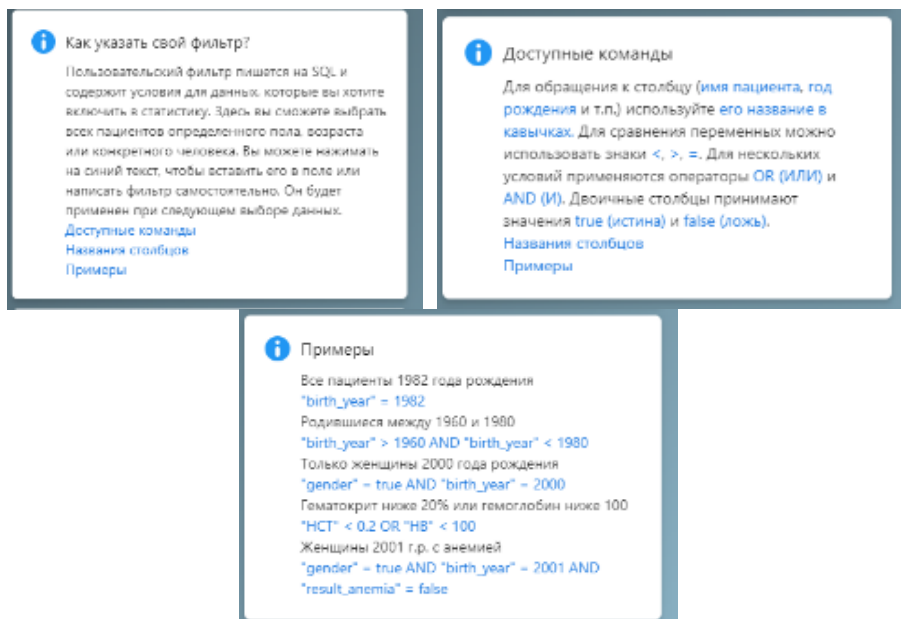
Имя: **Адилова**
 Фамилия: **Адилова**
 Пол: **Женский**
 Год рождения: **1978**

Диагноз от 16.10.2023, 23:00:00	Диагноз от 16.10.2023, 23:00:00	Диагноз от 16.10.2023, 23:00:00	Диагноз от 16.10.2023, 23:00:00
Показатели: Гемоглобин: 130.00 г/л Гематокрит: 42.37 % Эритроциты: 7.02*10 ¹² /л Ферритин: 64.00 мкг/л В12: 190.00 нг/л	Показатели: Гемоглобин: 133.00 г/л Гематокрит: 36.70 % Эритроциты: 7.56*10 ¹² /л Ферритин: 23.00 мкг/л В12: 92.00 нг/л	Показатели: Гемоглобин: 108.00 г/л Гематокрит: 33.17 % Эритроциты: 6.43*10 ¹² /л Ферритин: 53.00 мкг/л В12: 192.00 нг/л	Показатели: Гемоглобин: 104.00 г/л Гематокрит: 47.12 % Эритроциты: 5.66*10 ¹² /л Ферритин: 32.00 мкг/л В12: 370.00 нг/л
Индекс крови: МСН: 18.30 фл МСНС: 29.60 % МСV: 87.80 фл	Индекс крови: МСН: 17.60 фл МСНС: 32.40 % МСV: 103.50 фл	Индекс крови: МСН: 16.80 фл МСНС: 30.40 % МСV: 79.60 фл	Индекс крови: МСН: 18.50 фл МСНС: 30.70 % МСV: 93.10 фл
Результат: Нет анемии	Результат: Нет анемии	Результат: Анемия Микроцитарный тип Нормоцитарный тип Характер не определен	Результат: Нет анемии
Удалить диагноз	Удалить диагноз	Удалить диагноз	Удалить диагноз

1-сурет. Демографиялық және медициналық деректері бар пациенттің карточкасы
Ескерту – автормен құрастырылған

б) Дәрігердің пайдаланушының өтініші бойынша пациенттердің статистикасын біріктіру функциясын эксперименттік зерттеу. Денсаулық паспортының бағдарламалық кешенінің тиісті модулі келесі функцияларды қамтамасыз етеді: графикалық интерфейс арқылы диагностикалық мәліметтер базасына қол жеткізуді қамтамасыз ету; диаграмма

құру үшін деректерді таңдау (демография және анемияның жіктелуі); сұранысты нақтылау үшін пайдаланушы сүзгісін жасау; шығыс диаграммасын сақтау/жүктеу мүмкіндігі; статистиканы басқару бойынша интерактивті анықтама беру (2-сурет).



2-сурет. Статистиканы басқару бойынша кіріктірілген интерактивті анықтама
 Ескерту – автормен құрастырылған

с) DataAcquisition модулін эксперименттік зерттеу. Dataacquisition модулі жасанды интеллект үшін деректер жиынтығын орталықтандырылған жинауды, қол жеткізуді және басқаруды қамтамасыз етеді. Бұл модуль дәрігердің пайдаланушылық сұранысы бойынша пациенттердің статистикасын біріктіреді. Транзакциялар тізімі бар dataacquisition Модулінің терезесі 3-суретте көрсетілген.



3-сурет. Транзакциялар тізімі бар DataAcquisition модулінің терезесі
 Ескерту – автормен құрастырылған

Денсаулық паспортының бағдарламалық кешенінің DataAcquisition модулі келесі функцияларды қамтамасыз етеді: талдау үшін дәрігердің стандартталған деректер жинағын жүктеу; өңдеудің барлық кезеңдеріндегі деректерді бақылау (жою, алдын ала қарау, жүктеу); белгілі бір транзакция үшін өңдеудің келесі кезеңдеріне өту.

d) Data Pre processing модулін эксперименттік зерттеу. Data preprocessing модулі Денсаулық паспортының бағдарламалық кешенінің деректерін өңдеуге, тазартуға және оңтайландыруға арналған. Алдын ала өңдеуден өткен кезде алдыңғы модульде жүктелген деректер data preprocessing модулінде мынадай түрлендірулерден өтеді: ондық бөлгішті стандарттау (нүкте); мүмкіндігінше жолдарды сандарға түрлендіру; жетіспейтін деректері бар жолдардан тазарту; қате деректері бар жолдардан тазарту; шығарындыларды жою; жас топтары бойынша топтастыру.

e) MathematicalEvaluation модулін эксперименттік зерттеу. MathematicalEvaluation модулі клиникалық-гематологиялық синдромалардың индикаторларын математикалық модельдеуге арналған. Есептелген индекстердің мысалы (тәуекел пайыздық шкала түрінде) 4-суретте көрсетілген.



4-сурет. Есептелген индекстердің мысалы (тәуекел пайыздық шкала түрінде көрсетілген) *Ескерту – автормен құрастырылған*

Диагностикалық іздеудің басында «эритронның перифериялық буынының бұл жағдайы анемиялық синдромға сәйкес келе ме және патологияның ауырлығы» деген сұраққа жауап беріледі. Бұл бағалау алты диагностикалық белгі бойынша жүргізіледі: гемоглобин деңгейі (HGB), эритроциттер саны (RBC), гематокрит (HCT), эритроциттердегі гемоглобиннің орташа мөлшері (MCH), эритроциттердің орташа көлемі (MCV) және эритроциттердегі гемоглобиннің орташа концентрациясы (MCHC).

Аталған көрсеткіштердің әрқайсысы үшін қалыпты мәндер диапазоны негізінде патологияға жату индикаторлары (пайызбен) есептеледі. Әрі қарай, осы алты индекс (mHb, mhv, mRBC, mMCH, mMCHC, mMCV) анемияға жату индикаторын есептеу үшін қолданылады (M) (1) (Умурзакова & Раимова, 2023):

$$\sum M = m_{HGB} * 0,5 + m_{HCT} * 0,1 + m_{MCHC} * 0,1 + m_{MCH} * 0,1 + m_{MCV} * 0,1 + m_{RBC} * 0,1 \quad (1)$$

Содан кейін, анемия түрі үшін микро және макро – MCH, MCV индикаторлары (нормо-MCH, MCV индикаторлары mMCH, mMCV сәйкес келеді) және олардың негізінде Mmcrо, Mmcrо, Mmcrо типтеріне жататындар есептеледі (2):

$$M_{\text{тип}} = m_{\text{тип-МСН}} * 0,5 + m_{\text{тип-МСV}} * 0,5 \quad (2)$$

f) Morphological Classification модулін эксперименттік зерттеу. Morphological Classification модулі бұрын жүктелген деректер мен есептелген тәуекел көрсеткіштері негізінде ауруды морфологиялық жіктеуге арналған.

M индикаторы анемиялық синдромға жату дәрежесі болып табылады және 0-ден 100 %-ға дейінгі мәндерді қабылдай отырып, НВ, НСТ, RBC және қан индекстерінің патологиялық көрсеткіштері негізінде есептеледі. 20 %-дан жоғары M мәндерінде анемияға күдік анықталады, ал 50 %-дан жоғары – анемия, 20 %-дан төмен-норма.

Анемиялық синдром болған кезде индикаторларға негізделген анемия түрі анықталады: макроциттік анемия үшін Mмакро, нормоцитарлық анемия үшін Mрмо, микроциттік үшін Mмикро. Әрбір индикаторда 50 % шегі бар, оның үстінде тиісті типке жататындығы анықталады. Анемия бірнеше индикаторлар 50 %-дан жоғары болған кезде аралас болуы мүмкін. Анемияның сипаты мәндері 50 %-дан жоғары болған кезде тиісті индикаторлар негізінде белгіленеді. Мысалы, темір тапшылығы анемиясының болуын анықтаған кезде нәтиже келесідей болуы мүмкін: M = 0,8; m микро = 0,8, Mмакро = 0,0, Mрмо = 0,2; MЖДА = 0,7.

g) Ensembling модулін эксперименттік зерттеу. Ensembling модулі графикалық интерфейс арқылы диагностиканы нақтылау үшін машиналық оқыту ансамбльдерін құруға және қолдануға арналған. Ансамбльдеу – нәтижелердің дәлдігін жақсарту үшін әртүрлі комбинацияларда бірнеше модельдерді пайдалануға мүмкіндік беретін машиналық оқыту әдісі (Zhang, Liu & Shen, 2022). Бұл зерттеуде қолданылатын ансамбль түрлері – бустинг, бэггинг, дауыс беру және стекинг (Mienye & Sun, 2022)]

Ensembling модулі келесі мүмкіндіктермен интуитивті пайдаланушы интерфейсін арқылы модельдерді құрастыруды жүзеге асырады: ансамбль түрін және архитектураның ілеспе параметрлерін таңдау; болжау үшін кіріс және шығыс айнымалысын таңдау; модельдің дұрыс құрылысын тексеру және оны жазбаны қосу мүмкіндігімен пайдаланушы атымен сақтау; өлшемдер мен қол жетімді деректерді автоматты түрде анықтай отырып, оқыту және болжау үшін деректер жиынтығын қосу; таңдалған тапсырма үшін ықтимал комбинацияларды көрсете отырып, оқыту немесе болжау үшін кез келген қолжетімді «үлгі-деректер жиыны» комбинациясын пайдалану; модельдер мен күндерді басқару: өзгерту, қарау және жою.

Ансамбль құруға арналған интерфейс 5-суретте көрсетілген.

5-сурет. Ансамбльдерді жобалауға арналған терезе

Ескерту – автормен құрастырылған

g) Neural модулін эксперименттік зерттеу. Neural модулі графикалық интерфейсті қолдана отырып, диагностика кезінде жасырын заңдылықтарды табу үшін нейрондық желілердің архитектурасы мен гиперпараметрлерін құруға арналған. Neural модулі келесі мүмкіндіктерді ұсынады: кіріс және шығыс деректерін көрсете отырып, графикалық конструктор түрінде нейрондық желі архитектурасын белгілеу; модельдің гиперпараметрлерін теңшеу: оңтайландырғыш, шығын функциясы, дәуір саны, партия мөлшері және тексеру пайызы; өлшемдер мен кол жетімді деректерді автоматты түрде анықтай отырып, оқыту және болжау үшін деректер жиынтығын (деректер жиынтығын) қосу; таңдалған тапсырма үшін ықтимал комбинацияларды көрсете отырып, оқыту немесе болжау үшін кез келген қолжетімді «үлгі-деректер жиыны» комбинациясын пайдалану; модельдер мен күндерді басқару: өзгерту, қарау және жою; сервер қосымшасынан журналдарды тікелей шығаратын кіріктірілген консоль.

Neural Модулінің модельдерінің мысалы 6-суретте келтірілген.



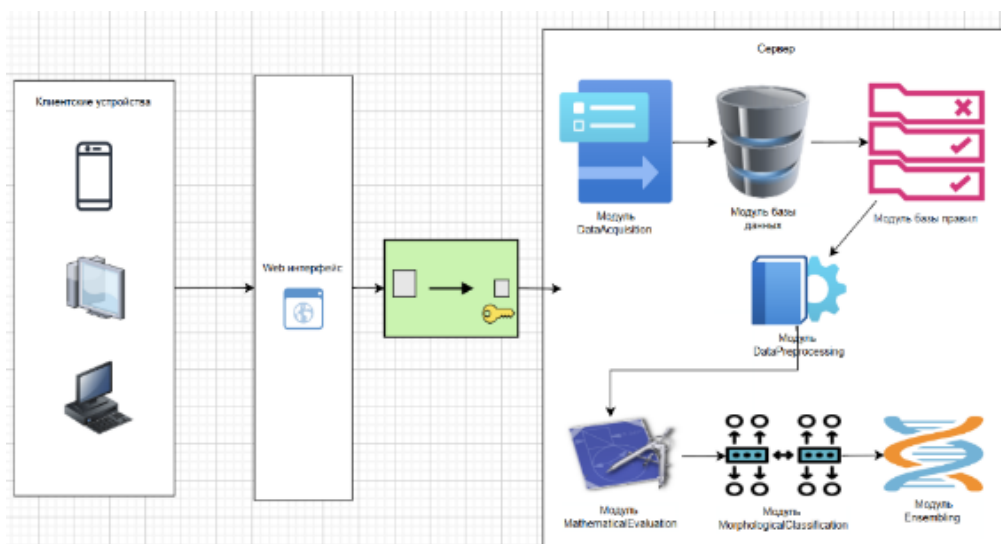
6-сурет. Модельдердің мысалы (сол жақта) және датасеттер (оң жақта)

Ескерту – автормен құрастырылған

Neural модулін гиперпараметрлерді автоматты түрде таңдау мүмкіндіктерімен толықтыруға болады (мысалы, hyperopt немесе Optuna арқылы), бұл пайдаланушының араласуынсыз оңтайлы параметрлерді табуға мүмкіндік береді.

Нәтижелер және оларды талқылау. Денсаулық паспортына арналған клиникалық-гематологиялық синдромдарды диагностикалаудың бағдарламалық-аппараттық кешенінің архитектуралық моделі жүйенің әртүрлі компоненттерінің құрылымы мен өзара әрекеттесуін сипаттайды. Ол медициналық деректерді жинау, өңдеу және талдау үшін бірлесіп жұмыс істейтін бағдарламалық және аппараттық компоненттерді қамтиды. 7-суретте архитектуралық модельдің жалпы схемасы көрсетілген.

Денсаулық папортының деректерін жіктеу міндеттері үшін алгоритмдердің тиімділігі машиналық оқытудың негізгі әдістерімен бағаланды: сызықтық / радиалды SVM (Altın, Budak & Özcan, 2023); логистикалық регрессия (Das, 2024); жақын көршілер әдісі (K-Nearest Neighbors, KNN) (Wang, Chukova & Nguyen, 2023); шешім ағашы (Srivastava et al., 2023); Naive Bayes (Peretz, Koren & Koren, 2024); кездейсоқ орман (Sun et al., 2024).



7-сурет. Денсаулық паспортының бағдарламалық-аппараттық кешенінің архитектуралық моделі

Ескерту – автормен құрастырылған

Талдау үшін денсаулық паспортының деректер жиынтығынан көрсеткіштер мен қан индекстері сияқты туынды бағандар алынып тасталды. Осылайша, модельді оқыту үшін қан анализінің негізгі деректері мен анемияны жіктеу нәтижелері ғана қалады. Деректерді сүзіп, жоғарыда аталған негізгі мәндерді таңдағаннан кейін айнымалылар арасындағы байланысты бақылау үшін корреляциялық матрица құрған жөн. Екі матрица құрылады: біреуі барлық айнымалыларды корреляциялау үшін, екіншісі мақсатты және бастапқы айнымалылар арасындағы корреляция үшін қажет (Chen et al., 2021).

Күтілгендей, бұл деректер жиынтығы қанның негізгі параметрлері арасындағы ұқсас тәуелділіктерді көрсетеді (Sharifani & Amini, 2023). Барлық негізгі ML алгоритмдері үшін K-fold валидациясымен оқыту және тестілеу жүргізілді (Dutschmann, Kinzel, Ter & Baumann, 2023), бұл 1-кестеде келтірілген келесі нәтижелерді берді.

1-кесте. Модель бойынша дәлдік нәтижелері

	Result	Microcyt	Macrocyt	Normal	Mmahz	Mmzhda
Linear Svm	0.8014	0.9586	0.9764	0.9528	0.9823	0.9470
Radial Svm	0.8135	0.8820	0.9467	0.9143	0.9852	0.9617
Logistic Regression	0.7954	0.9499	0.9645	0.9350	0.9823	0.9499
KNN	0.7955	0.8820	0.9467	0.9143	0.9852	0.9617
Decision Tree	0.8902	0.8789	0.9438	0.9379	0.9853	0.9291

Ескерту – автормен құрастырылған

Дәлдік төмендеді деп болжануда, өйткені жаңа деректер жиынтығы шынайырақ, жолдар бойынша қысқа және оқу жиынтығынан туынды индекстерді алып тастауға байланысты болуы мүмкін. 2-кестеден көріп отырғаныңыздай, кездейсоқ орман ең жақсы нәтиже көрсетті (орташа дәлдік 93,9 %), одан кейін LinearSVM, Logistic Regression және Decision Tree (сәйкесінше 93,6 %, 92,9 % және 92,6 %). Жоғарыда айтылғандай, RF қазірдің өзінде ансамбль әдісі болып табылады, сондықтан оның орнына келесі ең жақсы модельдер қолданылады.

2-кесте. Модель бойынша дәлдік нәтижелері

Модель және бағалаушы саны	Дәлдігі
Boosting: LGBM	0.9468
Bagging: E15-DTree	0.9443
Voting: soft, DT + LSVM + LR	0.9453
Stacking: DT + LSVM + LR, final – LSVM	0.8834
Random Forest – highest basic model acc.	0.9399
Decision Trees – highest non-ensembling acc.	0.9261
<i>Ескерту – автормен құрастырылған</i>	

Ансамбль әдістерінің көпшілігі немесе олардың кем дегенде бір конфигурациясы ансамбльсіз негізгі модельдердің кез келгеніне қарағанда жоғары дәлдікті көрсетті, бұл ансамбль әдістері клиникалық және гематологиялық синдромдарды дифференциалды диагностикалау үшін жақсырақ нәтиже бере алатынын дәлелдеді, деректер жиынының нақты қасиеттеріне негізделген алгоритмді қосымша теңшеу/таңдау.

Қорытынды. Мақалада зертханалық зерттеулердің деректерін өңдеуді автоматтандыруға, клиникалық-гематологиялық синдромдарды диагностикалауға және дәстүрлі әдістерді де, жасанды интеллектті де қолдана отырып пациенттерді басқаруға арналған инновациялық шешім болып табылатын денсаулық паспортының бағдарламалық кешенінің есептеу-аналитикалық модульдері сипатталған. Жүйе клиникалық-гематологиялық синдромдарды тиімді диагностикалауға және диагностиканың дәлдігін жақсартуға мүмкіндік беретін медициналық ақпаратты жинауға, өңдеуге және талдауға арналған әртүрлі модульдерді қамтиды. Кешеннің негізгі компоненттеріне мәліметтер базасымен жұмыс істеуге, деректерді өңдеуге және математикалық өңдеуге арналған модульдер, сондай-ақ морфологиялық жіктеуге және машиналық оқытуды қолдануға арналған аналитикалық модульдер кіреді. Кешенді енгізу клиникалық-диагностикалық орталықтарда, зертханаларда және ауруханаларда медициналық қызметтердің сапасын едәуір жақсартуға ықпал етеді.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

Алғыс. Бұл зерттеуді Қазақстан Республикасы Ғылым және жоғары білім министрлігінің Ғылым комитеті қаржыландырады (ЖТН АР19679525 «Электрондық денсаулық паспортына арналған клиникалық-гематологиялық синдромдарды диагностикалаудың бағдарламалық кешені»).

Ғылыми мақаланы жазу процесінде генеративті ЖИ және оның көмегімен технологияны қолдану туралы хабарлама. Бұл мақаланы жазу процесінде авторлар генеративті жасанды интеллект технологиясын немесе оны қолдайтын құралдар қолданбады.

Әдебиеттер тізімі

- Назарбаев, Н. (2018). «Стратегия Казахстан-2050»: новый политический курс состоявшегося государства: послание Президента Республики Казахстан-Лидера нации Нурсултана Назарбаева народу Казахстана от 14 декабря 2012 года.
- Акулин, И.М., Чеснокова, Е.А., Пресняков, Р.А., Прядко, А.Е., & Гурьянова, Н.Е. (2022). Электронная медицинская карта: опыт правового регулирования стран ЕАЭС. Врач и информационные технологии, (1), 72-83.
- Ambalavanan, R., Snead, R. S., Marczika, J., & Malioukis, A. (2024). Epidemiological contemplation for a currently pragmatic COVID-19 health passport: a perspective. *Frontiers in Public Health*, 12, 1347623.
- Ismukhamedova, A., Uvaliyeva, I., & Belginova, S. (2024). Integrating machine learning in electronic health passport based on WHO study and healthcare resources. *Informatics in Medicine Unlocked*, 44, 101428.

- Мищенко, И.А., Волынская, Е.В., Давыдова, С.С., Коробова, С.А., & Панов, С.Ф. (2021). Практика внедрения электронного паспорта здоровья в образовательных учреждениях. *Перспективы науки и образования*, (6 (54)), 536-554.
- Soh, T. Y. T., Rosdy, M. N. M., & Sabri, B. A. M. (2023). Exploring the need for an oral health passport. *International Dental Journal*, 73, S13-S14.
- Hennessy, S., Nash, M., & Donohue, G. (2024). Enhancing physical health monitoring in people with severe mental illness: the development of a health passport. *Mental Health Practice*, 27(4).
- Айтбаева, Г., Токатова, Ж., & Маханбетова, М. (2023). Перспективы цифровизации экономики Казахстана. *Scientific Collection «InterConf»*, (145), 131-134.
- Towett, G., Snead, R. S., Grigoryan, K., & Marczika, J. (2023). Geographical and practical challenges in the implementation of digital health passports for cross-border COVID-19 pandemic management: a narrative review and framework for solutions. *Globalization and Health*, 19(1), 98.
- Умурзакова, Р. З., & Раимова, Д. А. (2023). Современные методы диагностики и лечения постгеморрагических анемии. *Экономика и социум*, (5-2 (108)), 1147-1152.
- Zhang, Y., Liu, J., & Shen, W. (2022). A review of ensemble learning algorithms used in remote sensing applications. *Applied Sciences*, 12(17), 8654.
- Mienye, I. D., & Sun, Y. (2022). A survey of ensemble learning: Concepts, algorithms, applications, and prospects. *IEEE Access*, 10, 99129-99149.
- Altin, F. G., Budak, İ., & Özcan, F. (2023). Predicting the amount of medical waste using kernel-based SVM and deep learning methods for a private hospital in Turkey. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 33, 101060.
- Das, A. (2024). Logistic regression. In *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research* (pp. 3985-3986). Cham: Springer International Publishing.
- Wang, A. X., Chukova, S. S., & Nguyen, B. P. (2023). Ensemble k-nearest neighbors based on centroid displacement. *Information Sciences*, 629, 313-323.
- Srivastava, A., Samanta, S., Mishra, S., Alkhayyat, A., Gupta, D., & Sharma, V. (2023). Medi-Assist: A Decision Tree based Chronic Diseases Detection Model. In *2023 4th International Conference on Intelligent Engineering and Management (ICIEM)* (pp. 1-7). IEEE.
- Peretz, O., Koren, M., & Koren, O. (2024). Naive Bayes classifier—An ensemble procedure for recall and precision enrichment. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 136, 108972.
- Sun, Z., Wang, G., Li, P., Wang, H., Zhang, M., & Liang, X. (2024). An improved random forest based on the classification accuracy and correlation measurement of decision trees. *Expert Systems with Applications*, 237, 121549.
- Chen, L., Li, S., Bai, Q., Yang, J., Jiang, S., & Miao, Y. (2021). Review of image classification algorithms based on convolutional neural networks. *Remote Sensing*, 13(22), 4712.
- Sharifani, K., & Amini, M. (2023). Machine learning and deep learning: A review of methods and applications. *World Information Technology and Engineering Journal*, 10(07), 3897-3904.
- Dutschmann, T. M., Kinzel, L., Ter Laak, A., & Baumann, K. (2023). Large-scale evaluation of k-fold cross-validation ensembles for uncertainty estimation. *Journal of Cheminformatics*, 15(1), 49.

Information about authors

Uvaliyeva Indira – Doctor PhD, the School of Digital Technology and artificial intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, E-mail: iuvalieva@ektu.kz

Tezekpaeva Shynar – PhD student, the School of Digital Technology and artificial intelligence, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan, E-mail: shtezekpaeva@edu.ektu.kz

Borozenets David – 4rd year student of the EP «Mathematical and Computer Modeling», D.Serikbayev Oskemen, East Kazakhstan technical university, Oskemen, Kazakhstan, E-mail: borozenets.david.sh4@yandex.kz

Kalymbek Ulan – 1 year student of the EP «Computer science and software», D.Serikbayev Oskemen, East Kazakhstan technical university, Oskemen, Kazakhstan, E-mail: kalimbek.ulan@gmail.com



СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_242
IRSTI 44.29.01

**G.M. Abdukalikova¹, L.M. Utepbergenova², Zh.A. Shakhmov³,
D.G. Bakirova⁴, A.A. Abdymazhitova⁵**

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

¹E-mail: abdukalikova_gm@mail.ru*

²E-mail: utepber78@mail.ru

³E-mail: zhanbolat8624@mail.ru

⁴E-mail: strelec6767@mail.ru

⁵E-mail: diasasan1985@mail.ru

WATER SUPPLY EFFICIENCY: METHODS FOR DETERMINING AND PREVENTING WATER LOSSES

СУМЕН ЖАБДЫҚТАУДЫҢ ТИІМДІЛІГІ: СУДЫҢ ШЫҒЫНДАРЫН АНЫҚТАУ ЖӘНЕ АЛДЫН АЛУ ӘДІСТЕРІ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОДОСНАБЖЕНИЯ: МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ПОТЕРЬ ВОДЫ

Abstract. The article is devoted to the actual problem of water losses in water supply systems and methods of their detection and prevention. Various approaches to reducing losses, including technical and managerial aspects, are analyzed. Attention is paid to innovative technologies, such as intelligent sensors and remote monitoring systems, which make it possible to quickly detect leaks and optimize the allocation of water resources. The article proposes an integrated approach to water supply management aimed at improving its efficiency and sustainability.

Keywords: water supply, water losses, reduction, information technology, strategy, modernization, reconstruction, construction.

Аңдатпа. Мақала сумен жабдықтау жүйелеріндегі судың жоғалуының өзекті мәселесіне және оларды анықтау мен алдын алу әдістеріне арналған. Шығындарды азайтудың әртүрлі тәсілдері, соның ішінде техникалық және басқару аспектілері талданады. Азып кетуді тез анықтауға және су ресурстарын бөлуді оңтайландыруға мүмкіндік беретін ақылды датчиктер мен қашықтықтан бақылау жүйелері сияқты инновациялық технологияларға назар аударылады. Мақала суды басқарудың тиімділігі мен тұрақтылығын арттыруға бағытталған кешенді тәсілді ұсынады.

Түйін сөздер: сумен жабдықтау, суды жоғалту, қысқарту, ақпараттық технологиялар, стратегия, жаңғырту, қайта құру, құрылыс.

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме потерь воды в системах водоснабжения и методам их обнаружения и предотвращения. Анализируются различные подходы к уменьшению потерь, включая технические и управленческие аспекты. Внимание уделяется инновационным технологиям, таким как интеллектуальные датчики и системы дистанционного мониторинга, которые позволяют оперативно выявлять утечки и оптимизировать распределение водных ресурсов. Статья предлагает комплексный подход к управлению водоснабжением, направленный на повышение его эффективности и устойчивости.

Ключевые слова: водоснабжение, потери воды, сокращение, информационные технологии, стратегия, модернизация, реконструкция, строительство.

Introduction. Water is a vital resource for sustaining life and infrastructure of any locality. An efficient water supply provides not only for the daily needs of the population, but also supports economic activity, health and social wellbeing. With urbanization and population growth, the reliability of water supply systems is becoming critical. Every year, the pressure of infrastructure increases, requiring not only the expansion of networks, but also the improvement of their efficiency. One of the key aspects of efficiency is minimizing water losses that can occur at various stages of water delivery from source to consumer. However, many urban systems face the problem of water loss, with significant financial and environmental consequences. Water losses in urban networks are not only a lost opportunity for municipalities, but also a threat to the sustainability of water resources. In the context of climate change and the increasing frequency of dry periods, conserving every drop becomes a priority for water security.

Detecting water losses is the first step to preventing them. Modern methods include the use of pressure transducers, acoustic sensors and remote monitoring systems, which allow for the rapid detection of leaks. Analyzing data from these devices helps to determine not only the location but also the possible causes of the problem.

Researchers at Indraprastha University (Indonesia) in their study (Harry Dhika, Achmad Daengs GS & Erlin Windia Ambarsari, 2018) note that water leaks in pipelines are a serious problem, as they cause financial losses for both the water supplier and customers. To further investigate this problem, the researchers analysed the monthly water losses over the course of a year. Prediction was done using ANFIS method and then the results were verified using back propagation method to assess the accuracy of the data. The results showed that the main cause of leakage was due to visible damages such as pipe cracks caused by complex soil composition (31.8% of losses with an error rate of 1%). Efforts are being made to replace leaking pipes and further research is being conducted on the materials used to manufacture the pipes, taking into account the specifics of the area where they are laid.

The paper (Ishido & Takahashi, 2014) notes the importance of early diagnosis and detection of pipeline leaks, as leaks can cause significant damage to the surrounding infrastructure.

Pipes that carry water are underground, thus, it is not easy to determine the exact location of a leak in the pipe wall. Without any preventative methods, leaks are usually detected whenever water comes out from underground in the event of a significant pipe rupture. Acoustic leak detection methods are a preventative approach. A qualified technician scans the suspected location, and the appearance of an unexpected sound indicates the presence of a leak. However, the accuracy and speed of the process depends solely on the skill of the expert (Hunaidi, 2000). A comprehensive review of leak detection methods is explored in (Liu & Kleiner, 2013), where the authors review new technologies for performing water pipe condition assessments.

Preventing water loss requires a comprehensive approach that includes regular maintenance, modernization of outdated systems and the use of innovative materials and technologies. Network pressure management programs, for example, can significantly reduce the risk of bursts and leaks. In addition, staff training and public awareness-raising play an important role in timely detection and remediation. Outdated water supply systems in settlements pose a serious challenge to the provision of reliable water supply. Ageing infrastructure leads to an increased risk of accidents, leaks and consequent water losses. These systems are often built with materials that corrode and deteriorate over time, exacerbating the problem.

The technical decay of these systems not only increases the operational costs of maintenance and repair, but also reduces the quality of water delivered to consumers. Burst pipes can lead to water contamination, endangering public health. In addition, frequent the normal course of city life.

Modernization is a key solution to the problems of outdated systems. Replacing old pipes with new ones made of more durable and corrosion-resistant materials can significantly reduce the number of leaks and accidents. Introduction of modern monitoring and diagnostics technologies allows not only to detect problems in time, but also to prevent their occurrence.

Investing in the renewal of the water supply network is an investment in the future. Properly planned and executed modernization works can significantly reduce operating costs, improve the quality of water supply and improve the living standards of the population. It is also important to consider sustainability and environmental aspects when selecting materials and technologies for system upgrades.

The problem of outdated water supply network requires immediate attention and action. Joint efforts of the government, local authorities, professionals and the public can lead to more reliable, efficient and environmentally friendly water supply systems.

Water loss detection and prevention is an integral part of sustainable water resources management and requires active implementation of new technologies and methodologies, as well as cooperation between different levels of government and society. This will not only reduce water losses, but also ensure its availability for future generations.

This article is devoted to methods of detection and prevention of water losses in urban water supply systems. We will review existing technologies and strategies, and explore how innovation can improve the efficiency and reliability of water supply. Special attention will be paid not only to technical aspects, but also to managerial, legislative and social factors that play a key role in addressing the problem.

Materials and methods. Scope of the problem. Experts estimate that, on average, 20 to 30 percent of water is lost in urban systems due to leakage and unauthorized use (<https://mk-kz.kz/economics/2022/07/14/poslednie-dvadcat-let-kazakhstan-pri/>). In some cases, this figure can be as high as 50 percent. This means that a significant portion of water that should be used for domestic and industrial needs is lost before it reaches the end user (<https://bizmedia.kz/2024-06-05-rk-teryat-13-vody-ona-ne-dohodit-do-polej/>).

Causes of losses. The main causes of water losses are:

- outdated infrastructure: many urban water supply networks were built decades ago and have not been updated since then;
- inadequate maintenance: lack of regular maintenance and monitoring of the networks leads to leaks;
- uncontrolled use: illegal connections to the network and water theft also contribute to losses (Kosygin, Khanin, Gosudarev & Fomina, 2010).

Consequences of losses. Water losses in urban systems lead to a number of negative consequences:

- economic losses: cities lose significant amounts of money due to the need for additional water treatment and pumping;
- environmental damage: leaks can lead to environmental pollution and depletion of water resources;
- social problems: water scarcity can exacerbate social inequalities, as the poor are more likely to suffer from water scarcity (Sakanov & Kaskirbaev, 2010).

In the Republic of Kazakhstan, as in many other countries, the problem of water losses in urban systems remains relevant. Only 9 regions in the country are 100% supplied with water (Stepancova, 2017). Water losses in cities of Kazakhstan vary depending on the state of infrastructure and efficiency of water supply systems. For example, in Almaty, water losses can reach up to 25%, while in Astana

this figure can be about 20%. In smaller cities, where water supply systems are older and less efficient, losses can be even higher.

Kazakhstan loses billions of cubic meters of water every year. The Ministry of Water Resources and Irrigation (MWR&I) reported that in 2023, losses in transporting this resource totalled 3.37 billion cubic meters. Of these, agriculture accounted for the largest share at 2.61 billion cubic meters. In 2022, losses amounted to 3.4 billion cubic meters (in agriculture – 2.69 billion cubic meters).

At the same time, "Kazvodkhoz", which is the largest subject of natural monopolies and a structural subdivision of the Ministry, provides services on supply of about 11 billion cubic meters of resource through channels annually (6-6.5 billion cubic meters – for irrigation). Regulatory and technical losses from intake to sale to the end consumer are about 20%. There are also losses during transport, costs for filling and maintaining the working water horizon. In addition, during reconstruction and repair and rehabilitation works, bypass canals are constructed at some sections. Since they are temporary, there are unaccounted losses (<https://www.lada.kz/kazakhstan-news/>).

Most of the canals were put into operation in the 1950's. Due to this, their technical condition becomes unsatisfactory and leads to a decrease in the coefficient of performance (COP). Now, 77 per cent of facilities have low efficiency. Only to maintain the design indicators it is necessary to carry out annual current repairs, and capital repairs – once in 8-10 years.

Since gaining independence, Kazakhstan has not initiated a comprehensive overhaul of its irrigation systems. Repairs have only been made to the most urgent sections, which has not effectively reduced water loss. Currently, there are no areas from the main intake structure to the consumer that have undergone significant rehabilitation.

In 2023, state authorities received approximately 43,500 official complaints from the public concerning water supply issues. Many of these complaints highlight severe deterioration of the networks and frequent breakdowns. For example, a local emergency was declared last year due to the extensive wear of the Nura group water pipeline in the Akmola region. Additionally, in Atyrau, the project to modernize the pumping and filtering station, which is about 90% worn out, has experienced delays (<https://kz.kursiv.media/2024-06-13/print1038-water/>).

Last year, leakage and unaccounted water consumption amounted to 218 million cubic meters, and the total amount of losses due to deterioration of water supply networks reached T16 billion. In terms of regions, Almaty was the leader in terms of leakage and unaccounted water consumption in 2023 – 33% (i.e. one third of water supplied to the network, more than 74 million cubic meters or over T4 billion). In Akmola region water losses amounted to 20%, in Zhambyl, Aktobe and Kostanay regions, as well as in the cities of Astana and Shymkent - from 13 to 16% (<https://stat.gov.kz/ru/>). The level of wear and tear of utility networks (water supply and sewerage) at the end of 2023 was 57%. At the same time, the level of their renewal is low and annually averages a little more than 5%. This is a huge standardized water losses.

Main canals have exhausted their resources, physical deterioration of some of them is 100%. It is necessary to carry out a full-fledged accounting to clarify the number and technical condition of water management facilities and structures. Since the independence of the Republic of Kazakhstan, full-scale passportization of water management facilities and structures has not been carried out.

In 2021, water withdrawal for economic and population needs was 24.6 km³, dropping slightly to 24.5 km³ in 2022, and increasing to 24.9 km³ in 2023 (The concept of development of the water resources management system of the Republic of Kazakhstan for 2024-2030). While this trend is relatively stable, an increase is anticipated due to rapid development in the oil and gas sector in Western Kazakhstan and the mining sector in Central Kazakhstan.

The issue of groundwater utilization is pressing. As of 2023, there are 4,416 deposits (5,384 sites) with approved exploitable groundwater reserves totaling 43,120.56 thousand m³/day across the country.

Table 1. Indicators of water withdrawals and losses in agriculture, industry and municipal sector

Economic sectors	Years, abstraction and loss rates, (km ³)							
	2010-2020		2021		2022		2023	
	fence	losses	fence	losses	fence	losses	fence	losses
Utilities sector	0,94	0,18	0,95	0,15	1,0	0,17	1,3	0,2
Agriculture	15,17	2,94	15,5	3,1	14,7	3,0	14,2	2,7
Industry	5,59	0,189	5,8	0,15	5,9	0,2	5,9	0,2
Others	3,16	0,34	2,35	0,3	2,9	0,3	3,5	0,3
Total:	24,86	3,63	24,6	3,7	24,5	3,67	24,9	3,4

Note – compiled by the authors

The issue of groundwater utilization is pressing. As of 2023, there are 4,416 deposits (5,384 sites) with approved exploitable groundwater reserves totaling 43,120.56 thousand m³/day across the country (<https://exclusive.kz/grozit-li-kazahstanu-deficzit-vody/>):

A – 13428,23 thousand m³/day;

B – 13481,26 thousand m³/day;

C1 – 10675,31 thousand m³/d;

C2 – 5535,75 thousand m³/d.

Forecast reserves are about 40 km³/year.

Methods of water loss detection. Water loss in municipal water supply systems is a serious problem that requires effective detection and remediation methods. There are various technologies and approaches to locate leaks and estimate the amount of water lost.

1. Acoustic methods.

One of the most common methods of leak detection is the use of acoustic technologies. Specialized devices such as hydrophones and correlators can detect the sounds produced by water flowing out of pressurised pipes (Kosygin, Khanin, Gosudarev & Fomina, 2010). These devices can be used for both spot inspection and monitoring over large sections of the network.

Water leaking directly from the point of a leak generates sounds that travel through the ground to the surface. Acoustic leak detectors capture these sounds using a ground microphone and display the intensity and frequency spectrum either graphically or digitally.

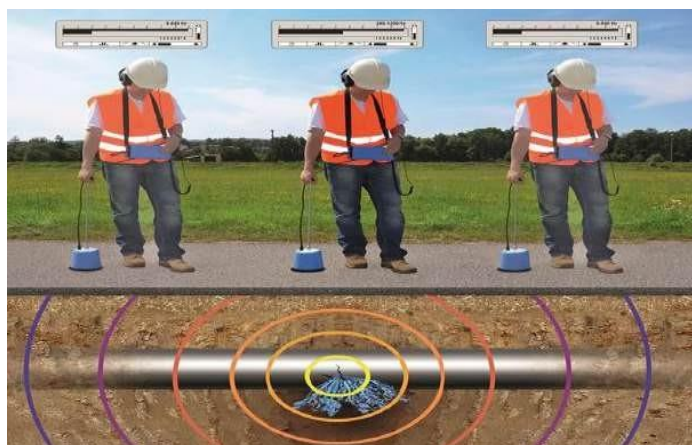


Figure 1. Method of acoustic leak detection in water pipes

Note – compiled by the authors based on photos from the Internet (https://yandex.kz/images/search?from=tabbar&img_)

2. Ground Penetrating Radar

Ground penetrating radar (GPR) is a portable technology that uses short electromagnetic pulses to investigate a land area. It can penetrate the ground and rock to depths of 15-20 meters, providing visual indications of rock layers and hidden objects.



Acoustic leak detector A10



Correlation leak detector K10-3M

Figure 2. Devices for detecting damage on water mains

Note – compiled by the authors based on photos from the Internet (<https://ekb.ruskransnab.ru/sites/default/files/Articles/termo-akusticheskiy-techeiskatel-10t-19336.jpg>, <https://image.jimcdn.com/app/cms/image/transf/dimension=970x10000;format=jpg/path/sbe025e17a3cd8012/image/i37fab05d711d6dfb/version/1391377054/image.jpg>)



Figure 3. Portable GPR for water leak detection

Note – compiled by the authors based on photos from the Internet (https://avatars.mds.yandex.net/i?id=88a3219d08d2919438dd5ff2004ec03b_1-5299402-images-thumbs&n=13)

In damp areas, there is a noticeable increase in relative dielectric permittivity, which is clearly displayed on the radar image (Timoshkin, 2001) This method enables reliable leak detection even when the precise location of the pipeline is unknown, thanks to GPR's high efficiency in surveying large areas quickly.

3. Gas tracers.

This method entails injecting a harmless gas into the water mains, which can be easily detected using specialized detectors. If a leak occurs, the gas escapes from the system and can be identified above ground, indicating the location of the issue. Although this approach has some limitations and may not be the most convenient, it is highly accurate and can detect smaller leaks more effectively than other methods for locating hidden leaks.

4. Hydraulic monitoring.

Hydraulic monitoring systems analyze the pressure and flow of water at various points in the water supply system. Anomalies in this data may indicate the presence of leaks.



Figure 4. Water leak detection device using indicator gas

Note – compiled by the authors based on photos from the Internet (https://a3-ng.com/assets/cache_image/products/2271/untitled3016_0x0_d34.webp)

5. Intelligent monitoring systems.

Results. With advancements in technology, intelligent systems are now being developed that leverage machine learning algorithms to analyze water consumption data and detect unusual patterns that could signify losses. This equipment offers round-the-clock remote access to data. Additionally, wireless telemetry systems and data services are being designed specifically for remote monitoring, including long-term observations of underground water pipes.

Loss Prevention Strategies and Technologies. In the Republic of Kazakhstan, as in many other countries, addressing water losses is an urgent issue that requires immediate action. Water losses in supply systems not only drive up operational costs but also have detrimental effects on environmental sustainability and social welfare (Kublanovskiy, 2019). As illustrated in Figure 5, there were 1,900 incidents in the water supply system in 2021. Over 19,000 kilometers of networks need to be replaced, accounting for 22% of the total length. This includes 6,200 kilometers of water conduits, 9,700 kilometers of street networks, and 3,500 kilometers of intra-block and intra-courtyard networks (https://forbes.kz/news/newsid_290908/).

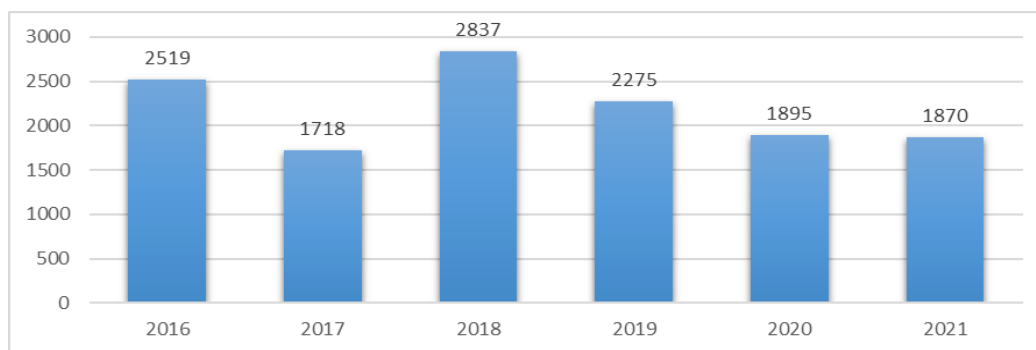


Figure 5. Number of accidents of water supply facilities (units)

Note – compiled by the authors based on photos from the Internet (<https://img.forbes.kz/forbes-photobank/media/2024-05-17/6a2f313f-55d6-43a2-8b5e-288af199464c.webp>)

The primary emphasis in combating water losses is on repairing and modernizing outdated water supply infrastructure. This involves replacing old, deteriorated pipes, installing modern shutoff and regulating devices, and utilizing new materials and technologies that resist corrosion and mechanical damage.

For 2024, the national budget has allocated 218 billion tenge for the execution of 324 projects aimed at constructing and reconstructing water supply and wastewater disposal systems. Of this total, 106 billion tenge is designated for urban projects, while 112 billion tenge is earmarked for rural initiatives (<https://bizmedia.kz/2024-06-11-218-mlrd-tenge-pojdut-na-stroitelstvo/>).

Digitalization and innovation are crucial for modern water resource management. They enhance the efficiency of water supply systems while ensuring their sustainability and reliability.

Intelligent water supply systems consist of integrated solutions that feature automated data collection, analysis, and realtime decision-making (Piskunov, 2019). This is accomplished through the use of sensors, controllers, and software that monitor and manage all aspects of system operations, including pipe pressure and water quality.

Data collection and analysis are essential components of digitalization (see Figure 6). With the help of modern data collection technologies like IoT devices, it is possible to acquire precise information about the water system's status at any moment. This data can be utilized to optimize system performance, prevent accidents and leaks, and facilitate longterm infrastructure planning.

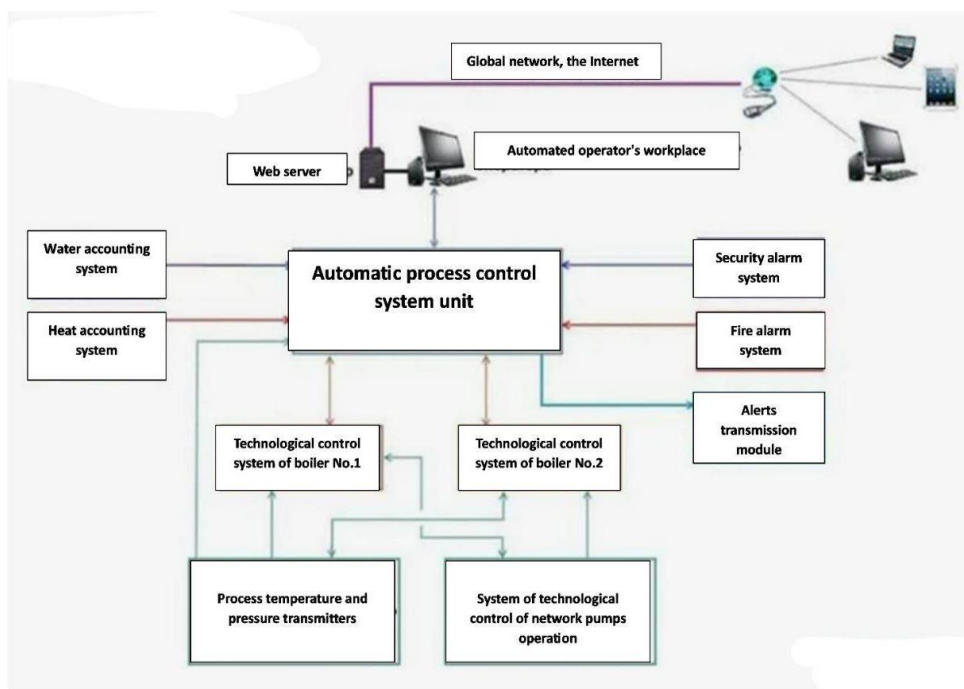


Figure 6. Structural Diagram of Automation for an Automated Control System

Note – compiled by the authors based on photos from the Internet (https://bts.net.ua/wa-data/public/site/btsnetu-aimg/acy_tp_kotelna_block-sxema.jpg)

Modern remote monitoring and control technologies enable the rapid detection and resolution of leaks, as well as the optimization of the entire water supply system's operation. The implementation of smart grids and the Internet of Things (IoT) enhances the accuracy of monitoring water consumption and quality.

A key aspect of modernization is the training and qualification of personnel involved with the water network. Specialists must be well versed in new technologies and working methods to manage resources more effectively and prevent losses (Sultanbekova, 2024).

The Government of Kazakhstan approved the Concept for the Development of the Water Resources Management System for 2024-2030 in a resolution dated February 5, 2024. This Concept aims to establish a comprehensive water resources management system that addresses

conservation and rational usage for the health and well-being of the country's citizens, while balancing the needs of various economic sectors with environmental considerations. This year, 218 billion tenge has been allocated from the national budget for the implementation of 324 projects focused on the construction and reconstruction of water supply and wastewater disposal systems. Of this amount, 106 billion tenge will be allocated to urban areas, while 112 billion tenge will be directed to rural areas.

In 2025, the goal is to provide 100 percent coverage for the population of 19 cities. To achieve this, 83 projects for the construction of water supply networks in these cities are planned. Of these, 27 projects are expected to be completed by the end of this year, while 28 will be finished in 2025.

The Ministry of Water Resources and Irrigation of the Republic of Kazakhstan has initiated 28 projects focused on the construction and reconstruction of water pipelines. The intended outcome is to enhance the quality of drinking water supply in 426 settlements, serving a population of 1.1 million people. The total length of the water pipelines scheduled for construction and reconstruction exceeds 2,000 kilometers, with completion planned within two years.

In the North Kazakhstan Region, 10 projects are underway, along with 6 in the Kyzylorda region, 4 in Akmola, 2 each in Almaty and Ulytau, and one project each in Atyrau, Mangistau, Turkestan, and West Kazakhstan (<https://zhaikpress.kz/ru/news/v-426-naseleennyx-punktax-postroyat/>).

Conclusion. Strategies and technologies to prevent water losses in the Republic of Kazakhstan should be aimed at comprehensive improvement of the water supply network. Repair and modernization of infrastructure, application of modern technologies and staff training are key elements of a successful water management strategy (Chaadaev & Chaadaeva, 2021).

To solve the problem of water loss, a comprehensive approach is needed, including:

- modernization of infrastructure: replacement of old pipes and equipment with more modern and reliable ones;
- improved monitoring: introduction of remote monitoring and control systems for timely detection of leaks;
- raising awareness: educational programs for the public on the importance of water conservation and combating illegal water use.

The issue of water loss in supply systems demands attention and proactive action from government agencies, utilities, and the public. Collaborative efforts can lead to sustainable water management and ensure access to clean water for all segments of the population.

Digitalization and innovation in water supply present new opportunities to enhance the efficiency and reliability of systems. The implementation of intelligent systems and data-driven decision-making contributes to the development of smart cities and promotes sustainable growth.

To effectively detect and eliminate water losses, a comprehensive approach utilizing various methods is essential. By applying modern technologies and innovative solutions, it is possible to significantly reduce losses and achieve more sustainable water management.

Conflict of interest. The author(s) declare that there is no conflict of interest.

Notice of Use of Generative AI and AI-assisted technologies during the writing of the manuscript. When preparing this work, the authors did not use AI tools

References

- Harry Dhika, Achmad Daengs GS, Erlin Windia Ambarsari (2018). Forecasting Water Loss Due To Pipeline Leakage By Using ANFIS And BACKPROPAGATION Approach (Study Case At PDAM Tirta Kahuripan On District of Bogor) // ICASI. EAI DOI: 0.4108/eai.23-4-2018.2277589.
- Ishido, Y.; Takahashi, S. (2014). A new indicator for real-time leak detection in water distribution networks: Design and simulation validation. *Procedia Eng.* 89. – Pp. 411–417
- Hunaidi, O. (2000). Detecting Leaks in Water-Distribution Pipes. *Inst. Res. Constr.* 40. – Pp. 1-6.

- Liu, Z.; Kleiner, Y. (2013). State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes. *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, 46. – Pp. 1-15.
<https://mk-kz.kz/economics/2022/07/14/poslednie-dvadcat-let-kazakhstan-pri/>. <https://bizmedia.kz/2024-06-05-rk-teryat-13-vody-ona-ne-dohodit-do-polej/>.
- Kosygin A.B., Khanin V.N., Gosudarev K.I., Fomina I.V. (2010). Monitoring of hidden leaks on the water supply network. Report presented at the international conference «NO-DIG – 2010» // Kosygin A.B., Khanin V.N., Gosudarev K.I., Fomina I.V. (2010). Monitoring skrytykh utechek na vodoprovodnoi seti. Doclad, predstavlenyi na mezhdunarodnoi konf. «NO-DIG – 2010»
- Sakanov K.T., Kaskirbaev K.K. (2010). Ways to reduce water loss in the municipal water supply. *Science and Technology of Kazakhstan*. – № 1. – Pp. 88-92 // Sakanov K.T., Kaskirbaev K.K. (2010). Puti sokrashcheniya poteri vody v kommunalnom vodosnabzhenii. *Nauka I tekhnika Kazakhstana*. – № 1, 88-92.
- Stepancova N.A. (2017). Technical and economic analysis of pipeline and water supply system failure. *Economics of construction and water use*, №1 (2). – Pp. 32-36 // Stepancova N.A. (2017). Tekhiko-economiceskii analiz otkaza truboprovodov sistemy vodosnabzheniya. *Economica stroitelstva i vodopolzovaniya*, №1 (2), 32-36.
<https://www.lada.kz/kazakhstan-news/>. <https://kz.kursiv.media/2024-06-13/print1038-water/> <https://stat.gov.kz/ru/>
- The concept of development of the water resources management system of the Republic of Kazakhstan for 2024-2030. <https://exclusive.kz/grozit-li-kazahstanu-deficizit-vody/>.
- Kosygin A.B. Khanin V.N., Gosudarev K.I., Fomina I.V. (2010). Detection of hidden leaks using the monitoring system of the water supply network. *Water supply and sanitary equipment*, № 2(06), PP. 22-26 // Kosygin A.B. Khanin V.N., Gosudarev K.I., Fomina I.V. Obnaruzhenie skrytykh utechek s ispolzovaniem sistemy monitoring vodoprovodnoi seti. *Vodosnabzhenie I sanitarnaiya tekhnika*, № 4, 22–26.
- Timoshkin A.C. (2001). Devices for determining the condition and locations of damage to pipelines of heating networks. *Heat supply news*, № 2(06).PP. 29–31 // Timoshkin A.C. (2001). Pribory dlya opredeleniya sostoyaniya I mest povrezhdenii truboprovodov teplovykh setei. *Novosti teplosnabzheniya*. – № 2(06), 29-31.
- Kublanovskiy L.B. (2019). Determining the location of damage to pressure pipelines. – M.: Nedra, P. 136 // Kublanovskiy L.B. (2019). Opredelenie mest povrezhdenii napornykh truboprovodov. – M. Nedra, 136.
https://forbes.kz/news/newsid_290908/.
<https://bizmedia.kz/2024-06-11-218-mlrd-tenge-pojdut-na-stroitelstvo/>.
- Piskunov N.S. (2019). Differential and integral calculus. M.: Fizmatlit, T.2, P. 575 // Piskunov N.S. (2019). *Differencialnoe I integralnoe ischislenie*. V 2 t., M. Fizmatlit, T. 2, 575.
- Sultanbekova P.S. (2024). An algorithm for reducing losses in water supply systems. Collection of the international scientific and practical conference. Tashkent. // Sultanbekova P.S. (2024). Algoritm deistviya sokrashcheniyui poter v sistemakh vodosnabzheniya. *Sbornik mezhdynarodnoi nauchno-prakticheskoi konferencii*, Tashkent, 2024.
<https://zhaikpress.kz/ru/news/v-426-naselennyx-punktax-postroyat/>.
- Chaadaev V.K., Chaadaeva V.V. (2021). Development of a strategy to reduce losses and unaccounted for water costs. *International Scientific research journal*. – №4. – P. 46 // Chaadaev V.K., Chaadaeva V.V. (2021). Razrabotka strategii sokrashcheniyui poter I neuchtennikh raskhodov vody. *Mezhdynarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*. – № 4, 46.

Information about authors

Abdualikova Gulnar – Senior instructor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: abdualikova_gm@mail.ru, +77011823769

Utebergenova Laura – Candidate of Technical Sciences, associate Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: utepber78@mail.ru, +7778 541 05 20

Shakhmov Zhanbolat – PhD, Associated professor, Department of Civil engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: zhanbolat8624@mail.ru

Bakirova Dana – Senior Lecturer, Department of Civil engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: strec6767@mail.ru

Abdymazhitova Assel – Master's student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: diasasan1985@mail.ru, +7701 619 08 11

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_252
MFTAA 52.01.21

Б. Апшикур¹, Т.Т. Ипалаков², М.М. Алимкулов³, А.К. Капасов⁴

Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

¹E-mail: bapshikur@edu.ektu.kz

²E-mail: TlPalakov@ektu.kz*

³E-mail: m.alimkulov@alt.edu.kz

⁴E-mail: azamat040594@mail.ru

ТЕРЕҢ КАРЬЕР БОРТТАРЫНЫҢ ОРНЫҚТЫ ЕҢІСТЕРІНІҢ РЕСУРС САҚТАУШЫ ПІШІНДЕРІ МЕН ПАРАМЕТРЛЕРІН НЕГІЗДЕУ

ОБОСНОВАНИЕ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ ФОРМ И ПАРАМЕТРОВ УСТОЙЧИВЫХ ОТКОСОВ БОРТОВ ГЛУБОКОГО КАРЬЕРА

SUBSTANTIATION OF RESOURCE-SAVING FORMS AND PARAMETERS OF STABLE SLOPES OF THE SIDES OF A DEEP QUARRY

Аңдатпа: Зерттеудің мақсаты – әдістерді талдау негізінде терең карьерлер борттарының ұтымды, тұрақты бейінін таңдау және есептеудің тиімді әдістемесін өзірлеу. Мақалада әртүрлі геомеханикалық жағдайларда терең карьерлердің борт маңайындағы массивінің тау жыныстарының кернеулі-деформацияланған күйін бағалау бойынша жүргізілген зерттеулердің негізінде, карьерлік беткейлердің тұрақтылығының бұзылуын қалыптастырушы кеніштің геологиялық, гидрогеологиялық және тау-кен орнының техникалық шарт жағдайлардың себептері анықталды. Зерттеуде карьерлік беткейлер параметрлерінің тау-кен-геологиялық жағдайларға сәйкес келмеуі немесе осы жағдайлардың жеткіліксіз зерттелуі, тау-кен жұмыстарын дұрыс жүргізбеу, гидростатикалық және гидродинамикалық күштердің жыныстарға әсері, тау-кен-көлік кешенінің, жаппай жарылыстардың әрекетінен болатын динамикалық қосымша жүктемелері, көлбеу параметрлерін есептеудің дұрыс емес әдісін қолдану секілді себептер айқындалды. Осыдан деформациялық құбылыстарды талдау негізінде, беткейлерде көшкіннің пайда болуын шарттайтын жағдайлар, тау жыныстары массивінің тепе-теңдік күйінің бұзылуына әкелетін күштердің көрінуіне ықпал ететін табиғи және жасанды процестердің жиынтығы екендігі дәлелденді.

Көлемдік қираудың вертикалды призмасын бөлу барысында шеңберлі цилиндрлік гипотеза базалық ретінде қабылданды. Алынған мөлiметтер нәтижесінде карьер борттарының тұрақтылығын есептеу әдістері талданып, карьердің жұмыс борттарының бұрышының ұлғаюына 15-45 м сатысының биіктігі ең үлкен әсер ететіні анықталды. Жазық сатылы және жазық пішінді аралық контурлардың ұтымды еместігі айқындалды.

Зерттеу қорытындысының практикалық және теориялық негізінде карьердің жұмыс аймағының бүйірлік беткейінің тегіс дөңес профилі ең үнемді әдіс екендігі анықталды. Бұл бейін тұрақтылықты қамтамасыз етіп, адамдар мен технологиялық жабдықтардың қауіпсіз жұмыс жағдайларын құрумен қатар, тегіс профилімен салыстырғанда аршу жұмыстарының көлемін 25,3 мың м³ азайтуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: терең карьерлер, борттық массив, кернеулі деформацияланған жағдай, ішкі үйкеліс бұрышы, көлбеу бұрышы, көлбеу профилі, тұрақтылық шегінің коэффициенті.

Аннотация. Целью исследования является разработка эффективной методики выбора и расчета рационального, стабильного профиля борта глубоких карьеров на основе анализа методов. В статье на основании проведенных исследований по оценке напряженно-деформированного состояния горных пород бортового массива глубоких карьеров в различных геомеханических условиях выявлены причины геологических, гидрогеологических и технических условий горного месторождения, формирующих нарушение устойчивости карьерных склонов. В

исследовании учитывалось несоответствие параметров карьерных склонов горно-геологическим условиям или недостаточное изучение этих условий, неправильное проведение горных работ, влияние гидростатических и гидродинамических сил на породы, динамические нагрузки от действия горно-транспортного комплекса, массивных взрывов. Кроме того, выявлены такие причины, как дополнительные нагрузки на склоны или прилегающие к бровкам участки, применение неправильного метода расчета параметров склона. Исходя из этого, на основе анализа деформационных явлений доказано, что условия, обуславливающие возникновение оползней на склонах, представляют собой совокупность природных и искусственных процессов, способствующих проявлению сил, приводящих к нарушению состояния равновесия массива горных пород.

В ходе разделения вертикальной призмы объемного разрушения в качестве основы была принята круговая цилиндрическая гипотеза. В результате полученных данных проанализированы методы расчета устойчивости бортов карьера и установлено, что наибольшее влияние на увеличение угла рабочего борта карьера оказывает высота ступени 15-45 м. Выявлена нерациональность плоскостных ступенчатых и плоскостных промежуточных контуров.

На практической и теоретической основе заключения исследования установлено, что наиболее экономичным методом является плоский выпуклый профиль боковой поверхности рабочей зоны карьера. Этот профиль обеспечивает устойчивость и, помимо создания безопасных условий работы людей и технологического оборудования, позволяет уменьшить объем вскрышных работ на 25,3 тыс. м³ по сравнению с плоским профилем.

Ключевые слова: Глубокие карьеры, Бортовой массив, Деформированное состояние под напряжением, Угол внутреннего трения, Угол наклона, Профиль наклона, Коэффициент Предела устойчивости

Abstract. The purpose of the research is to develop an effective methodology for selecting and calculating a rational, stable profile of the board of deep quarries based on the analysis of methods. Based on the conducted studies on the assessment of the stress-strain state of rocks of the side array of deep quarries in various geomechanical conditions, the causes of the geological, hydrogeological and technical conditions of the mining deposit, which form a violation of the stability of the quarry slopes, are identified in the article. The study took into account the discrepancy between the parameters of the quarry slopes and mining and geological conditions or insufficient study of these conditions, improper mining operations, the influence of hydrostatic and hydrodynamic forces on rocks, dynamic loads from the mining and transport complex, massive explosions. In addition, such reasons as additional loads on the slopes or areas adjacent to the eyebrows, and the use of an incorrect method for calculating slope parameters were identified. Based on this, based on the analysis of deformation phenomena, it is proved that the conditions causing the occurrence of landslides on the slopes are a combination of natural and artificial processes that contribute to the manifestation of forces leading to a disturbance of the equilibrium state of the rock mass.

During the separation of the vertical prism of volumetric fracture, the circular cylindrical hypothesis was adopted as the basis. As a result of the data obtained, methods for calculating the stability of the sides of the quarry were analyzed and it was found that the height of the step 15-45 m has the greatest effect on increasing the angle of the working side of the quarry. The irrationality of planar stepped and planar intermediate contours is revealed.

Based on the practical and theoretical conclusions of the study, it was found that the most economical method is a flat convex profile of the side surface of the working area of the quarry. This profile ensures stability and, in addition to creating safe working conditions for people and technological equipment, reduces the volume of stripping operations by 25.3 thousand m³ compared to a flat profile.

Keywords: Deep quarries, Side array, Deformed state under stress, Angle of internal friction, Angle of inclination, Slope profile, Coefficient of Stability limit

Кіріспе. Зерттеу объектісі ашық тау-кен жұмыстары кезіндегі массивке тау-кен-технологиялық эсер ету салдарынан туындайтын техногендік геомеханикалық процестер болып табылады.

Белгілі болғанындай, қатты пайдалы қазбалар кен орындарын игерудің ашық тәсілі, бірқатар объективті себептер бойынша тау-кен өнеркәсібі жүйесінде жетекші орынға ие болады. Олардың негізгілері келесідей (Мельник В. В., 2021):

1) пайдалы компоненттері аз болған кезде, күрделі тау-кен-геологиялық жағдайдағы пайдалы қазбалар кен орындарын пайдалануға тарту қажеттілігі. Мұндай кен орындарын

қуатты технологиялық жабдықты қолдана отырып, үлкен қарқындылықпен және өнімділікпен ғана пайдалану тиімді, бұл тек Ашық тау-кен жұмыстары кезінде мүмкін болады.

2) жер қыртысының үстіңгі бөліктеріндегі кеніш қорының сарқылуына байланысты, қатты пайдалы қазбалар кен орындарын игеру тереңдігінің артуы (600-800 және одан да көп метрге дейін).

3) үлкен тереңдікте тау-кен жұмыстарын жүргізу қаупі, бұл тау-кен жұмыстары дамыған сайын, геомеханикалық жағдайдың нашарлауын келтіріп шығарады.

Осыған байланысты карьер бортының беткейлерінің тұрақтылығын басқарудың жылдам және сенімді әдістерін жасау үшін, геомеханикалық процестерді болжау және модельдеу мәселесі аса маңызды болып табылады (Nizametdinov, F.K. and Ozhigin, S.G. and Nizametdinov, N.F. and Oralbay, A.O., 2021).

Ашық тау-кен жұмыстарының тереңдігінің өсу үрдісі әртүрлі тау-кен геологиялық жағдайларында, тау жыныстарының көлбеу массивтерінің кернеулі-деформацияланған күйін бағалаудың есептік әдістерінің сенімділігі мен жеделдігін арттыру қажеттілігін туындатады. Осы негізде, терең карьерлердің борт беткейлерінің тұрақты параметрлерін есептеудің инженерлік әдістерін, борт беткейлерінің ұтымды формаларын жобалаудың сенімді әдістерін жасау қажет болады.

Жүргізілген зерттеу, Қазақстан Республикасы Білім және ғылым Министрлігінің іргелі ғылыми жобалар бағдарламасы бойынша авторлар жүргізген ғылыми зерттеулердің нәтижесі болып табылады. Қойылған міндеттерді шешу тау-кен жұмыстарының тереңдігіне қарай, геологиялық және тау-кен-техникалық жағдайлары өзгерген кезде үлкен тереңдікте пайдалы қазбалар кен орындарын ашық игерудің тиімділігін арттыруға бағытталған (Rakhmangulov, A.; Burmistrov, K.; Osintsev, N., 2022). Жасалынған зерттеу жұмыстарын талдау нәтижесінде қатты пайдалы қазбалардың кешенді кен орындарын игеру жүйелері мен параметрлерін жоспарлау үшін, карьер бортының ұтымды және тұрақты беткейлерін таңдау мен жобалаудың жаңа әдістері келтірілген (Mahmudov, D.R.; Kadirov, V.R.; Karimov, S.H.V. et al., 2020).

Бұл зерттеу нәтижелерінде тәуекелдерді бағалау және терең карьерлердің борттық еңісіндегі тау жыныстарының жүйелік сенімділігін талдау және жазық-сатылы бейіні бар еңістердің орнықты еңістерін бағалау әдістемесі, жазық сатылы бейіндегі еңістердің борттық массивінің кернеулі-деформацияланған жай-күйінің өзгеру заңдылықтарын зерттеумен, тегіс және күрделі профильдері бар карьердің бүйір беткейлерінің кернеулі-деформацияланған күйінің өзгеру заңдылықтары бойынша пәндік зерттеулер негізінде, тиімді әдістермен ұсыныстар әзірленген (Апшикур Б., Ипалаков Т.Т., Капасов А.К., Алимкулов М.М. и др., 2021).

Материалдар және зерттеу әдістері. Терең карьерлердің борт беткейлерінің тұрақтылығы бойынша мәселелерді шешуде, нәтижелердің қажетті дәлдігін қамтамасыз ете отырып, нақты тау-кен геологиялық жағдайлары үшін ұтымды есептеу схемасын таңдау, көбінесе үлкен әдістемелік қиындықтармен байланысты болады. Бұл, жобаланатын және игерілетін кен орындарының табиғи жағдайларының алуан түрлілігімен, сондай-ақ беткейлердің тұрақтылығын есептеудің көптеген есептеу схемалары мен әдістерімен түсіндіріледі (Zairov Sh Sh, Nomdorov RU, Ashuraliev U.T., 2022).

Қазіргі уақытта мұндай әдістер жүз елуден асады (Zou P., Zhao X., Meng Z., Li A., et al., 2019). Тау жыныстарының кернеулі-деформацияланған күйін заманауи зерттеулерде беткейлердің тұрақтылығын есептеу үшін сызықтық-деформацияланатын (Ignatiev, Sergey A.; Sudarikov, Aleksandr E., et al., 2021) және шекті кернеулі ортаның (Ипалаков Т.Т., Апшикур Б., Капасов А.К., 2019) есептеу модельдерінің екі тобы қолданылады. Бірінші жағдайда, тау жыныстарының деформациясы мен ондағы кернеулер

арасындағы байланыс сызықтық заңдылықпен өрнектеледі. Бұл жағдайда есептеу кезінде суперпозиция әдісін қолдануға мүмкіндік беретін, күштердің тәуелсіздігі принципі қолданылады.

Осы принципті қолдана отырып, ең толық есептелген модель (Беляев Е.Н., А Бурдонов.Е., Мурзин Н.В., 2023) жұмыста ұсынылған. Талдау нәтижесінде (Huang, Wengui., 2023) ұсынылған әдіс, қажетті дәлдікті қамтамасыз етпейтінін көрсетеді (көлбеудің шекті биіктігін 3,5 есеге дейін көтеру). Зерттеулерде қолданылатын тағы бір әдіс – элементтердің соңғы беріктігін анықтау әдісі, алынған моделде есептеуді жеткілікті сенімді етпейтін және практикалық есептеулерде белгілі шектеулермен, бірқатар кемшіліктерге ие.

Тау кен массивтері сызықты емес, серпімді орта болып саналмайды. Келесі зерттеу материалына (Markov, A; Khasanov, A.R.; Kazakov, A.N.; Khaqberdiyev, et al., 2022) сәйкес, тау массивтерінің тұрақтылығын бағалау үшін, элементтердің соңғы беріктігін анықтау әдісін пайдалану, шекті күй әдістерімен салыстырғанда, соншалықты дәл мәліметтер бере алмайды.

Кеніштердің құлама беткейлерінің кернеулі-деформациялық жағдайын және тұрақтылығын бағалау үшін, сызықты-деформацияланатын күй модельдерін қолданып есептеу әдістері 5 класқа бөлінеді (А, Б, В, Г, Д). Мұнда әдістер класын бөлудің негізгі жіктеу белгісі, құлама беткейлерінің параметрлерін анықтау принципі болып табылады (Пономарев А.Б., Богомолова О.А., Богомолов А.Н., 2022).

Массивтің шекті кернеу теориясына негізделген есептеу әдістері. Бұл топ үшін А класының әдістері, массивтердің шекті кернеуінің кейбір аймақтардың әрбір нүктелерінде байқалатындай сусымалы ортаның математикалық кескінделуіне негізделген (В.В. Соколовский, 1960. – 243 б). Іс жүзінде Б тобының әдістері, шектеулі қолданыста деуге болады, өйткені олардың негізінде жатқан шекаралық жағдайлар, жоғарғы бөлігінде тік қабырғасы бар көлбеудің ойыс формасын белгілейді, бұл әрдайым ауданның литологиясына сәйкес келмейді.

А класының әдістерін қолдану аясын кеңейту үшін, дөңес пішіндегі беткейлерді есептеу әдістемесі ұсынылған (С.С. Галушкевичтің дифференциалдық тепе-теңдік теңдеулерін шешудің графикалық әдісі) (Горшков Н.И., Краснов М.А., Жданова С.М., 2021).

Тұрақтылықты есептеудің В классы әдістері. Әдістердің негізінде белгілі бір аймақты қанағаттандыратын шекті тепе-теңдік шарты орындалады. Бұл жағдайда, массивтен ең әлсіз беттің орнын тауып, осы аймақпен шектелген дененің тепе-теңдік жағдайларын анықтау қажет (Калужный А.С., 2021).

Аталған класс әдістері жобалау тәжірибесінде кеңінен ұсынылған. Сонымен қатар, жобалық схемалар – тегіс, дөңгелек-цилиндрлік, спиральды, қисық сызықты және сырғанау бетінің басқа формаларына арналған.

Сырғанау бетінің күрделі қисық пішіні. Есептеу әдістері, әлсіреген сырғанау беттерінің қисық сызығын есепке алуға негізделген әдістер тобына жатады (Wang, S., Ahmed, Z. & Wang, P., 2021). Осы топтың есептеу әдістері арасында ең танымал Г.А. Фисенко әдісі болды (Фисенко Г.А., 1966, 378 б.). Кемшілігі – құлау призмасының енін анықтау тәсілінің болмауы, бұл Г.А. Фисенко әдісін қолданған кезде есептеудің және алынған нәтижелердің екіұшты шешімін келтіріп шығарады.

Г класы бойынша есептеу әдістері. Аталған класс әдістердің екі тобын біріктіреді:

а) ВНИМИ әдістері (Тау-кен геомеханикасы және маркшейдер істер ғылыми-зерттеу институты – салааралық ғылыми орталығы);

б) Табиғи әлсіреген беттердің әртүрлі жағдайлары үшін, беткейлердің тұрақтылығының кеңістіктік есептерін шешу әдістері.

Кіші тобы әдістеріне Г.А. Фисенко, Н.Н. Куваев, Э.Л. Галустьян әзірлеген әдістер, КарПТИ (Қарағанды Мемлекеттік Техникалық Университеті) әдістері (И.И. Потапов, Р.П.

Окатов), Гилропроект (Э.Г. Газиев, Э.А. Фрейберг), Л.В. Савков, В.Н. Попов және т.б. екінші кіші топқа Голдштейн М.Н. (1917 ж.), Маслов Н.Н. (1982 ж.), Тейлор Д.В. (1937 ж.), Тер-Архелян У.А. (1962 ж.) және т.б. әдістер жатады. Жеке топқа П.Н. Панюковтың күрделі сырғанау беті бар массивтің тұрақтылығын бағалаудағы кеңістіктік есептер туралы әдісін жатқызуға болады.

Жоғарыда аталған Г класының әдістерінің ерекшелігі – тау жыныстарының күрделі және жарылған орталарында тұрақтылық есептерін шешуге қабілеттілігі.

Беткейлердің тұрақтылығын бағалаудың ықтималдық әдістері (Д класы). Бұған еңіс аймағындағы массивтің құлау ықтималдығы статистикалық бағалаумен анықталатын әдістер кіреді (Kumar V., Himanshu N., Burman A., 2019).

Бұл класстағы әдістер, екі кіші топқа бөлінеді. Біріншісі тұрақтылықты бағалауда, тау жыныстары массивінің тұрақтылығына әсер ететін факторлар жиынтығының статистикалық бағалауы негізінде жүргізілетін әдістерді біріктіреді (Певснер М.Е., 1978, 255 б.). Екінші топқа сенімділік теориясы негізінде беткейлердің тұрақты параметрлері қалыптасатын әдістер кіреді (Serafimovskii, Todor & Tasev, Goran et al., 2022).

Еңістердің тұрақтылығын анықтауда, ықтималдық әдістері әлі де кең таралмаған. Бірақ олар карьер беткейлерінің тұрақты параметрлерін сенімді негіздеу үшін үлкен келешегімен сипатталады.

Күрделі құрылымды полиметалл кен орындарын ашық әдіспен игеру кезінде, баланстық қорлардың көлемінен басқа, анықтаушы факторлар кен орнының тау-кен-геологиялық жағдайлары, тау жыныстары мен кендердің физикалық-механикалық қасиеттерінің пландағы және карьердің тереңдеуіне қарай өзгеруінің аймақтылығы, тау-кен массивінің құрылымдық-текстуралық ерекшеліктері болып табылады (Мельник В.В., 2021).

Аталғандардың соңғыларын карьер беткейлерінің тұрақтылығы мәселесін шешу кезінде ескеру қажет етіледі. Сонымен қатар, текстуралық-құрылымдық ерекшеліктер, жүйелер мен даму параметрлеріне айтарлықтай әсер етеді, өйткені көп бағытты тектоникалық кернеулердің беткейлерге әсері, айтарлықтай көлемдегі тау жыныстары массивінің жылжуына әкелуі мүмкін. Мұны кенішті игерудің көлікті және көліксіз жүйелерінде де ескеру қажет.

Кенішті игеру жүйесін таңдауды анықтайтын тау массивінің құрылымдық-тектоникалық ерекшеліктерінің элементтері-әлсіреу беттерінің кеңістіктік бағдары, олардың қарқындылығы, таралу формасы және әлсіреу беттерінің сипаты болып табылады.

Жоғарыда келтірілген анықтамалардың мәнін қысқаша талдаудан, карьерді бірнеше аспектілерде қарастыру қажет екендігі байқалады, яғни: геометриялық, технологиялық, техникалық және экономикалық (Mahmudov, D.R.; Kadirov, V.R.; Karimov, SH.V. et al., 2020).

Геометриялық мағынада карьер – бұл ашық тау-кен жұмыстарымен кен орнын игеру динамикасында жер бетінің үстінде немесе астында қалыптасатын көлемді дененің қимасы.

Технологиялық тұрғыдан бұл – жоғары өнімді технологиялық жабдықтар кешенін қолдана отырып, кеңістікте әртүрлі бағытта бағытталған пайдалы қазбалардың кен орындарын ең үнемді және қауіпсіз – ашық тәсілмен ашық өндіруге қызмет ететін тау-кен өндірісі.

Техникалық тұрғыдан алғанда, карьер – бұл тау-кен массасын дайындау, өндіру, тасымалдау бойынша технологиялық операцияларды функционалды түрде байланыстыратын, жабдықты орналастыруға арналған жер бетінің үстінде немесе астында ашық типтегі тау-кен өндірісі. Қорыта айтқанда, карьер экономикалық объект ретінде минералды шикізаттың белгілі бір түрінің қажеттіліктерін қанағаттандыру үшін, адамның экономикалық қызмет саласы болып табылады.

Жүйелік көзқарас тұрғысынан карьерді уақыт өте келе жартылай кеңістікте қарқынды дамып келе жатқан күрделі табиғи-технологиялық жүйе ретінде қарастырған жөн, өйткені кен орнының қорлары сыртқы ортаның жоғары өзгергіштігі жағдайында ашық тау-кен жұмыстарымен алынады. Мұндай жүйенің жұмыс істеу тиімділігі, оның барлық элементтерінің бағыты мен бірлік уақыттағы өзара әрекеттесуімен анықталады. Көпфункционалды технологиялық жүйе ретіндегі карьердің негізгі құрылымдық элементі – оның кертпелі сатысы (берма). Тау-кен жұмыстарының дамуы мен режиміне сәйкес, кен қорларын бағалауға, дайындауға және алуға байланысты тау-кен өндірісінің барлық технологиялық процестеріне саты шегінде практикалық шешім қабылданады (Nizametdinov, F.K. and Ozhigin, S.G. and Nizametdinov, N.F. and Oralbay, A.O., 2021).

Бұл игеру жүйесінің параметрлері мен кен денесінің жатыс элементтерінің байланыстары өзгерген жағдайда, жүктемелерді ең көп қабылдайтын кен сатысын қазынды бірлігі ретінде қабылдау қажеттілігін анықтайды (Ипалаков Т.Т., Апшикур Б., Капасов А.К., 2019).

Нәтижелері және оларды талқылау. Карьер борттары мен сатысының беткейлерінің деформациясы, көптеген факторлардың әсерінен тау жыныстарының қирауының механикалық процесі болып табылады.

Қазіргі уақытта карьер құламасы мен табиғи беткейлерді зерттеу, белгілі бір белгілерге сәйкес жүзеге асырылады – тау жыныстарының бұзылу сипаты мен жылдамдығы, процестің жүру тереңдігі, сырғанау бетінің пішіні. Бұл жағдайда көшкін құбылыстары мен деформациялық процестердің пайда болуына ықпал ететін жағдайларды зерттеуге баса назар аударылады. Бұл шарттар бірнеше топқа бөлінеді.

Аталғандардың негізгілері-тау-кен-геологиялық, гидрогеологиялық, климаттық және тау-кен-технологиялық болып табылады. Бұл жағдайлардың деформациялық процестердің пайда болуы мен жүруіне әсері келесідей (Пономарев А.Б., Богомоллова О.А., Богомоллов А.Н., 2022):

- учаскенің геологиялық құрылымы мен геотектоникасы, жыныстардағы деформациялық құбылыстардың пайда болуы мен олардың жүру жылдамдығына жалпы бейімділігін анықтайды (тау жыныстарының топтары, жарықшақ тектоникасының болуы, жарықтардың негізгі жүйелерінің бағыты мен ұзындығы және т.б.);

- массивтің сулы қабаты, деформациялық құбылыстардың қарқындылығы мен тереңдігіне ықпал етеді;

- климаттық жағдайлар, массивтің жер бетіне жақын бөліктеріндегі тау жыныстарының қирау процесінің басталуын анықтайды (орташа температура режимі, жауын-шашынның мөлшері мен сипаты және т.б.);

- тау-кен-технологиялық (бұрғылау-жару жұмыстарының ауқымы мен қарқындылығы, кен орнын игеру жүйесі, карьерлердің тереңдігі, борттардың еңістері мен саты еңістерінің еңіс бұрышы) массивтің жай-күйіне неғұрлым терең өзгерістер енгізетін және сайып келгенде ашық тау-кен жұмыстары аймағында деформациялық процестердің пайда болуын алдын ала айқындайтын негіз болып табылады.

Біз кен орны шегіндегі геологиялық факторлардың өзгергіштігін ескере отырып, карьердің жұмыс аймағының тау-кен технологиялық параметрлерін оңтайландырудың теориялық аспектілері мен әдістемелік әдістерін қарастырдық.

Бірақ технологиялық шешімдер, егер технологиялық тәртіп бұзылса және кен орнын игеру әртүрлі себептермен туындаған жобадан басқа параметрлер бойынша жүргізілсе, карьер борттарының тұрақтылығы шарттары бойынша жүзеге асырылмауы мүмкін. Түсті металл кендерінің полиметалл кен орындарын игеру тәжірибесі, карьердің борттық массивінің тұрақтылығын жоғалтудан туындаған асқынуларға байланысты өндірістің бүкіл циклі бұзылған кезде, көбінесе ауыр зардаптармен көптеген мысалдарды келтіреді (Wang, S., Ahmed, Z. & Wang, P., 2021).

Зерттеу міндеті, көп сортты кендерді өндіру технологиясын геомеханикалық қамтамасыз ету, карьердің бортының беткейіне ұтымды және тұрақты бейін беру негізінен тұрады.

Карьер борты бейінінің конструкциясына байланысты өндірілетін кеннің, аршылған жыныстардың жылдық көлемі, аршудың ағымдағы коэффициенті, тауар массасының шығындарының сандық және сапалық көрсеткіштері өзгереді. Борт бейінін (профилін) таңдаудағы қателіктер деформацияға және беткейлердің бұрыштарын түзету жұмыстарын келтіріп шығарады. Бұл барыста аршу жұмыстарының көлемі артып кетеді.

Рационалды бейінді орнату және карьер бортының тұрақтылығын қамтамасыз ету, формула (1) арқылы шешілетін қарапайым оңтайландырылған есептеу болып табылады:

$$Z_t^{BP} = (1 + E_H)^{T-t} \cdot \sum_{jk} [(C_{jk}^V + C_{jk}^{TP} + C_{jk}^{OO}) \cdot V_{jk}^B] \rightarrow \min \quad (1)$$

келесі шарт барысында:

$$V_{jk}^B = Q_{ijk} \cdot n_j \rightarrow \min \quad (2)$$

$$V_{jk}^{TP} = n_j \cdot \sum_{ijk} Q_{ijk} \cdot l_{ijk}^p + \sum_{jk} V_{jk}^B \cdot l_{jk}^B \quad (3)$$

$$n_{cp} \rightarrow \min \{ \sum_{jk} V_{jk}^B / \sum_{ijk} Q_{ijk}^O \} \quad (4)$$

мұндағы: Z_t^{BP} – t -шы жылдағы аршу жұмыстарын жүргізуге арналған жиынтық шығындар мың тг;

$C_{jk}^V, C_{jk}^{TP}, C_{jk}^{OO}$ – сәйкесінше j -горизонттың k -ші кенжарынан алынатын 1 м^3 аршылған жыныстарды қазу, тасымалдау және оларды үйіндіге шығару құны, тг.;

V_{jk}^B – j -ші горизонттың аршылған жыныстарының көлемі, мың/м³;

Q_{ijk} – j -горизонттың k -ші кенжарынан i -ші кен массасының мөлшері, т;

n_j – қабаттың аршу коэффициенті, м³/т;

l_{ijk} – k -ші кенжардан кен қоймасына дейінгі арақашықтық, км;

l_{jk} – j -ші горизонттың k -ші кенжарынан тау жынысы үйіндісіне дейінгі арақашықтық, км;

n_{cp} – өңдеу басталғаннан бастап орташа аршу коэффициенті, м³/т;

E_H – күрделі салымдар тиімділігінің нормативтік коэффициенті, $E_H = 0,12$;

T – карьердің жалпы бар болу уақыты, жыл;

T – карьердің пайда болғаннан бастап жұмыс жасау кезіндегі уақыт.

Есептеулер Николаевский мен Жәйрем карьерлерінің жағдайлары үшін келесідей шешілді:

1:4000 масштабтағы көлденең геологиялық планда дөңес-ойыс, жазық және басқа сатылы профильдерді қалпына келтіріп, оларды негізге және кейбір $H - hj$ -ге көлбеу бұрыштарын қою арқылы тұрақты тепе-теңдік жағдайына қоямыз да, Токмурзин Т.Т., Лисьев В.П., Ипалаков Т.Т. авторлар келтірген модельдеу әдісімен, сазды беткейдің құлау ықтималдығын бағалау, жұмыс аймағының геометриясын және көп сортты кендерді өндіру кезінде карьердің қалыпты жұмыс жағдайларын қамтамасыз ететін жұмыс жиектерін орналастыру мүмкіндігін ескере отырып, олардың әрқайсысы үшін ықтимал сырғанау беттерін есептейміз. Профиль формасының борттың тұрақтылығына әсері (Kadirov, Vokhid & Karimov, Sherzod, et al., 2021) ескеріледі.

Екі сынық сызығы бар жалпақ дөңес профильдің биіктігі, үш тең бөлікке бөлінеді. Сатының көлбеу бұрыштары табанында – $45 + \rho/2$, ортаңғы бөлігінде – жазық беткейдің көлбеу бұрышы (ρ – тау жыныстарының ішкі үйкеліс бұрышы) тең қабылданады.

Бір сатылы еңістің биіктігі екі тең бөлікке бөлінеді. Бөліктердегі саты жиектерінің көлбеу бұрыштары бір-біріне $\alpha = \alpha_l = 45^\circ$ (1-сурет) және 38° (2-сурет) тең қабылданады. Бір сатылы профильдің қауіпсіздік бермасының ені формула (5) бойынша анықталады:

$$r = H_n \cdot t \cdot m/n \tag{5}$$

мұндағы: H_n – жұмысшы аймағының биіктігі, м;

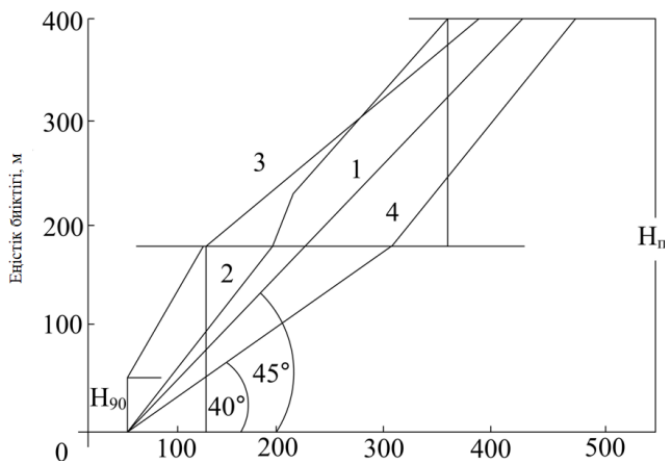
T – коэффициент; $t = r/\Delta$; $\Delta = h \cdot m$;

H – негіз кезіндегі α бұрышымен еніс бөлігінің (учаскесінің) биіктігі;

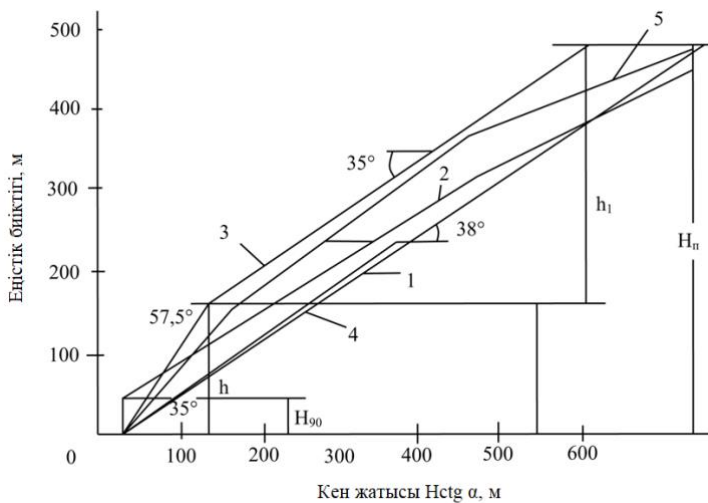
M – ықтимал құлау призмасының ені.

$$m = \sqrt{ctg\alpha \cdot ctg0,5(\alpha + \rho)} - ctg\alpha \tag{6}$$

мұндағы: n – тұрақты бейіні бар еніс учаскелерінің саны.



1-сурет. Карьер тереңдігі 360 м болған кездегі борт беткейінің профильін оңтайландыру схемасы
Ескерту – автормен құрастырылған



2-сурет. Карьердің тереңдігі 480 м болған жағдайда борт беткейінің профильін оңтайландыру схемасы
Ескерту – автормен құрастырылған

ψ көлбеу бұрышымен ең әлсіреген аймақ бойынша өтетін тегіс сырғанау беті бар сатылы профильдің шекті биіктігін нақтыланған формула (7) бойынша анықтайды (Mahmudov, D.R.; Kadirov, V.R.; Karimov, S.H.V. et al., 2020):

$$H_n = H_{90}/[1 - (1 - ctg\alpha_{\Delta} \cdot tg\psi) \cdot \lambda_c]^{-1} \quad (7)$$

мұндағы: H_n – сынық профильдің біртекті ортасындағы еңістің шекті биіктігі, м;

H_{90} – вертикаль бөліну жарықшағының тереңдігі, м;

$ctg\alpha_{\Delta}$ – еңістің жаттық пішініне келтірілген сатылы профильдің эквивалентті көлбеу бұрышының котангенсі, град;

λ_c – еңістің формасын ескеретін коэффициент:

$$\lambda_c = 1 - (ctg\alpha_{\Delta} - ctg\alpha) \cdot (ctg\psi - ctg\alpha)^{-1} \quad (8)$$

$$ctg\alpha_{\Delta} = ctg\alpha + (1 - n^{-2}) \cdot (ctg\alpha - ctg\alpha_1) \quad (9)$$

мұндағы: ψ – массивтің ең әлсіреген аймағындағы төмендетілген сырғанау бетінің потенциалды жазықтығының көлбеу бұрышы (Пономарев А.Б., Богомолова О.А., Богомолов А.Н., 2022):

$$\psi = (\alpha_{\Delta} + \rho)^{-2} + (\alpha - \alpha_{\Delta})/1,5n \quad (10)$$

Карьер беткейлерінің тұрақтылығын қамтамасыз ету бойынша ұсынылған шешімдерді эксперименттік нәтижелермен салыстыру барысында бірнеше маңызды аспектілер анықталды. Зерттеу барысында карьер беткейлерінің геомеханикалық тұрақтылығын қамтамасыз етуге бағытталған теориялық және аналитикалық әдістер негізінде алынған параметрлер тәжірибелік деректермен салыстырылды. Сонымен қатар, карьер беткейлеріндегі көшкіндердің алдын алу үшін ұсынылған көлбеу параметрлерін есептеудің жетілдірілген әдістемесі, тәжірибелік деректерге негізделген салыстыру арқылы дұрыстығын дәлелдеді. Динамикалық жүктемелер, гидростатикалық және гидродинамикалық күштердің әсері, сондай-ақ жаппай жарылыстар нәтижесінде пайда болатын кернеулерді бағалау тәжірибеде ұсынылған бейіннің тұрақтылығын растап, оның артықшылықтарын көрсетті.

Қорытынды. Геометриялық құрылымдар мен профильдің тұрақтылығын есептеу барысында $CM = 350 \text{ кН/м}^2$, ішкі үйкеліс бұрышы $\rho = 25^\circ$, жыныстар массивінің тығыздығы $\gamma_n = 25 \text{ кН/м}^3$, тау жыныстарының беріктік сипаттамаларына $ku = 1,3$ тұрақтылық коэффициенті енгізілді.

Есептік талдау нәтижесі көрсеткендей, неғұрлым ұтымды бейін (пор минимум, 3_t^{BP} минимум, V_{jk}^B минимум) бір сынықты және H_{90} табанымен (H_{90} – Т массиві үзілген кездегі вертикаль жарықшақтың пайда болу тереңдігі), жазық-дөңесті бейін болып табылады. Бірақ табанында H_{90} бар профиль, техникалық жағынан қолайсыз, сондықтан көлбеу табанынан төмен жатқан қорлардың алынуын қамтамасыз ету мүмкін болмайды.

Осыдан, карьердің жұмыс аймағының бүйірлік беткейінің тегіс дөңес бейіні (профилі), тұрақтылықты қамтамасыз етумен қатар, адамдар мен технологиялық жабдықтардың қауіпсіз жұмыс жағдайларын қамтамасыз етеді және тегіс профильмен салыстырғанда аршу жұмыстарының көлемін азайту $25,3 \text{ мың м}^3$ қа дейін азайтуға болатын ең үнемді болып табылады.

Тау жыныстары массивінің тұрақтылығына және кәсіпорын қызметінің экономикалық көрсеткіштеріне, еңіс геометриясының кешенді әсерін зерттеу негізінде, көп сортты кендерді өндіру барысында режимді жоспарлау үшін, тау-кен жұмыстары мен жұмыс аймағының параметрлерін басқаруға мүмкіндік беретін карьер борты еңісінің ұтымды конструкциясы теориялық тұрғыдан негізделді.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.
Ғылыми мақаланы жазу процесінде генеративті ЖИ және оның көмегімен технологияны қолдану туралы хабарлама. Мақаланы жазу барысында ЖИ (жасанды интеллект) немесе басқа да нейрожүйелер қолданылған жоқ.

Әдебиеттер тізімі

- Huang, Wengui. (2023). Stability of Homogeneous Slopes: From Chart to Closed-Form Solutions and from Deterministic to Probabilistic Analysis. *International Journal of Geomechanics*. 23. 04023136. <https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-8258>.
- Ignatiev, Sergey A.; Sudarikov, Aleksandr E., et al. (2021). "Determination of the stress-strain state of rock mass and zone of inelastic deformation around underground mine excavation using modern methods of numerical modelling" – *Journal of Sustainable Mining: Vol. 20: Iss. 3, Article 7*. Available at: <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1324>
- Kadirov, Vokhid & Karimov, Sherzod, et al. (2021). Study on the influence of the deformation zones of the quarry sides on the rock mass movement. *E3S Web of Conferences*. 304. 02002. [10.1051/e3sconf/202130402002](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130402002).
- Kalyuzhny A.S. (2023). Impact of static loading from mining equipment on the bench stability in hard rocks. *Russian Mining Industry*.(3):116–121. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-3-116-121>
- Kumar V., Himanshu N., Burman A. (2019). Rock slope analysis with nonlinear Hoek–Brown criterion incorporating equivalent Mohr–Coulomb parameters // *Geotechnical and Geological Engineering*. Vol. 37, no. 6, pp.
- Mahmudov, D.R.; Kadirov, V.R.; Karimov, SH.V. et al. (2020). "Research of the Influence of Technological Factors on the State of the Sides of Deep Quarries,"// *Technical Science and Innovation: Vol: Iss. 3, Article 15*. <https://doi.org/10.51346/tstu-01.20.3-77-0079>
- Markov, A; Khasanov, A R.; Kazakov, A N.; Khaqberdiyev, et al. (2022). "Evaluation of the stress-strain state of the kochbulak and kyzylalma deposits with tectonic stresses included with the finite element method," *Technical science and innovation: Vol. 2022: Iss. 3, Article 5*. <https://doi.org/10.51346/tstu-01.22.3-77-01882>
- Nizametdinov, F. K. and Ozhigin, S. G. and Nizametdinov, N. F. and Oralbay, A. O. (2021). Monitoring of the Benches and Sides Stability of the Quarries. *Energy- and Resource-Saving Technologies of Developing the Raw-Material Base of Mining Regions*. pp. 46-65. DOI:10.31713/m10053
- Rakhmangulov, A.; Burmistrov, K.; Osintsev, N. (2022). Selection of Open-Pit Mining and Technical System's Sustainable Development Strategies Based on MCDM. *Sustainability*, 14, 8003. <https://doi.org/10.3390/su14138003>
- Serafimovski, Todor & Tasev, Goran et al. (2022). General features of some polymetallic ore deposits in the Republic of North Macedonia. *Geologia Croatica*. 75. 349-364. <https://doi.org/10.4154/gc.2022.27>.
- Wang, S., Ahmed, Z. & Wang, P. (2021). Study of critical failure surface influencing factors for loose rock slope. *SN Appl. Sci*. 3, 65 <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04108-9>
- Zairov Sh Sh, Nomdorov RU, Ashuraliev U.T. (2022). Increasing the Stability of the Sides of the Quarry by Forming a Concave Profile of the Slope of a High Ledge. *Insights Min Sci technol*; 3(4):555617. <https://doi.org/10.19080/IMST.2022.03.555617>
- Zou P., Zhao X., Meng Z., Li A., et al. (2019). "A slope stability analysis for southern Wuchangping tin mine," *Journal of Vibroengineering*, Vol. 21. – № 4. – Pp. 998–1014. – Jun., <https://doi.org/10.21595/jve.2019.20381>
- Апшикур Б., Ипалаков Т.Т., Капасов А.К., Алимкулов М.М. и др. (2021). Оценка динамики изменения напряженно-деформированного состояния грунтов рабочей зоны земляного полотна при повышении осевой вагонной нагрузки. *Вестник «ВКГТУ»*. – №2. – С. 12-19 // Apshikur B., Ipalakov T.T., Kapasov A.K., Alimkulov M.M. i dr. (2021). Ocenka dinamiki izmeneniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntov rabochej zony zemlyanogo polotna pri povyshenii osevoj vagonnoj nagruzki. *Vestnik «VKGTU»*. - №2.- S. 12-19. https://doi.org/10.51885/1561-4212_2021_1_12
- Беляев Е.Н., АБурдонов.Е., Мурзин Н.В.(2023). Прогнозирование и оценка устойчивости бортов, уступов разрезов и откосов отвалов на каменноугольном месторождении с использованием программных комплексов Geostudio И Plaxis 3D // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. Вып. 1. С. 138-154 // Belyaev E.N., ABurdonov.E., Murzin N.V.(2023). Prognozirovanie i ocenka ustojchivosti

- bortov, ustupov razrezov i otkosov otvalov na kamennougol'nom mestorozhdenii s ispol'zovaniem programmnykh kompleksov Geostudio I Plaxis 3D // Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle. Vyp. 1. S. 138-154
- Горшков Н.И., Краснов М.А., Жданова С. М. (2021). Напряженно-деформированное состояние и устойчивость бортов карьера Унгличкан // «Известия вузов. Горный журнал». – № 6. – С. 42-55 // Gorshkov N. I., Krasnov M. A., Zhdanova S.M. (2021). Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie i ustojchivost' bortov kar'era Unglichikan // «Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal». – № 6. – S. 42-55.
- Мельник В. В. (2021). Геомеханический мониторинг геофизическими методами при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом // Проблемы недропользования. – №4. – С. 36-43 // Mel'nik V.V. (2021). Geomekhanicheskij monitoring geofizicheskimi metodami pri razrabotke mestorozhdenij poleznykh iskopaemykh otkryтым способом // Problemy nedropol'zovaniya. – № 4. – S. 36-43.
- Ипалаков Т.Т., Апшикур Б., Капасов А.К. (2019). Расчет напряженно-деформированного состояния земляного полотна многопутного участка, сооружаемого на слабых основаниях с армированием геосеткой // Вестник «ВКГТУ». – № 3. – С. 21-28 // Ипалаков Т.Т., Апшикур Б., Капасов А.К. (2019). Расчет напряженно-деформированного состояния земляного полотна многопутного участка, сооружаемого на слабых основаниях с армированием геосеткой // Вестник «ВКГТУ». – № 3. – С. 21-28
- Калюжный А.С. (2021). Анализ результатов оценки устойчивости борта карьера при плоском и объемном вариантах расчета// ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень.; (10):123-133 // Kalyuzhnyj A.S. (2021). Analiz rezul'tatov ocenki ustojchivosti borta kar'era pri ploskom i ob'emnom variantah rascheta // GIAB. Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'.; (10):123-133 DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_123
- Пономарев А.Б., Богомолова О.А., Богомолов А.Н.(2022). Расчет устойчивости откосов: учеб.-метод. пособие – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. – 128 с. // Ponomarev A.B., Bogomolova O.A., Bogomolov A.N. (2022). Raschet ustojchivosti otkosov: ucheb.-metod. posobie – Perm': Izd-vo Perm. nac. issled. politekhn. un-ta. – 128 s. Available at: https://www.researchgate.net/publication/362467860_Raschet_ustojchivosti_otkosov-A5/related

Information about authors

Апшикур БAITAK – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 070010, Ust Kamenogorsk, Serikbaeva str, 19, Professor of the School of Earth, tel.8(701)698-1788, e-mail: bapshikur@edu.ektu.kz

Ипалаков Т.Т. – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19 Serikbayeva str., Ust-Kamenogorsk, 070010, Doctor of Technical Sciences, Professor of the School of Earth Sciences, tel. 87772324179, e-mail: Tlpalakov@ektu.kz

Алимкулов Мурат Маметкулович – Academy of Logistics and Transport, 50012, Almaty, Shevchenko Str 97, associate Professor of the Department of "Construction Engineering", тел. 87078987691. E-mail: m.alimkulov@alt.edu.kz

Капасов Азамат Кайсарович – D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 070010, Ust-Kamenogorsk, Serikbaeva Str 19, master of science, lecturer of the School of Earth, tel. +7(775)9374044, e-mail: azamat040594@mail.ru

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_263
IRSTI 67.07.01

L.T. Baimuratova¹, T.M. Murat¹, G.D. Maulenova¹, T.K. Kuvatbayeva¹, T.S. Bakirova²

¹Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

E-mail: l.lin.b@mail.ru

E-mail: mtomiris2812@gmail.com*

E-mail: g.maulenova@satbayev.university

E-mail: t.kuvatbayeva@satbayev.university

²Azerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, Azerbaijan

E-mail: taranabakirova@gmail.com

SPECIFICITIES OF RECONSTRUCTION OF PANEL HOUSES IN 1950-1970 OF THE HISTORICAL CENTER OF KARAGANDA

ҚАРАҒАНДЫ ҚАЛАСЫНЫҢ ТАРИХИ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ 1950-1970 ЖЫЛДАРДАҒЫ ПАНЕЛЬДІ ҮЙЛЕРІН ҚАЙТА ҚҰРУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

ОСОБЕННОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАНЕЛЬНЫХ ДОМОВ 1950-1970 гг. ИСТОРИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ГОРОДА КАРАГАНДЫ

Аннотация. Настоящая научная статья посвящена исследованию перспектив реконструкции жилого фонда исторического центра города Караганды, представленного панельными домами, построенными в период с 1950-е по 1970-е годы. В исследовании проведен анализ архитектурных особенностей и технического состояния домов, выявлена потребность в их модернизации и адаптации к современным требованиям комфортного проживания. В статье рассматриваются различные аспекты реконструкции, включая использование новых технологий, материалов и архитектурных решений с целью улучшения энергоэффективности, безопасности и удобства жильцов. Реконструкция, как комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на устранение морального и физического износа зданий в целом или их отдельных элементов и систем, включает в себя модернизацию и обновление инфраструктуры здания. Она повышает качество жилья, помогает продлить сроки эксплуатации, делает данный жилой фонд актуальным и востребованным для людей, и способствует улучшению состояния главных улиц города. Научная статья обращает внимание на проблему панельного жилого фонда, и предлагает методы и инструментарий по проведению реконструкции в историческом центре города Караганды с учетом необходимых мероприятий конкретно для нынешней градостроительной ситуации. Результаты исследования могут быть полезными для городских планировщиков, архитекторов, инженеров и других специалистов, работающих в области обновления и модернизации жилых комплексов. Данный анализ может быть использован не только по отношению к панельному жилому фонду Караганды, но и к другим городам с учетом их историко-географического и градостроительного контекста.

Ключевые слова: Архитектура; реконструкция; панельные дома; Караганда; историческая застройка.

Аңдатпа. Бұл ғылыми мақала 1950-1970 жылдар аралығында салынған панельдік үйлермен ұсынылған Қарағанды қаласының тарихи орталығының тұрғын үй қорын қайта құру перспективаларын зерттеуге арналған. Зерттеу үйлердің архитектуралық ерекшеліктері мен техникалық жағдайына талдау жүргізді, оларды модернизациялау және жайлы тұрудың заманауи талаптарына бейімделу қажеттілігі анықталды. Мақалада қайта құрудың әртүрлі аспектілері, соның ішінде энергия тиімділігін, қауіпсіздігін және тұрғындардың ыңғайлылығын жақсарту мақсатында жаңа технологияларды, материалдарды және архитектуралық шешімдерді қолдану қарастырылады. Жалпы ғимараттардың немесе олардың жекелеген элементтері мен жүйелерінің моральдық және физикалық тозуын жоюға бағытталған ұйымдастырушылық және

техникалық іс-шаралар кешені ретінде қайта құру ғимараттың инфрақұрылымын жаңғыртуды және жаңартуды қамтиды. Бұл тұрғын үй сапасын арттырады, пайдалану мерзімін ұзартуға көмектеседі, бұл тұрғын үй қорын адамдар үшін өзекті және сұранысқа ие етеді және қаланың басты көшелерінің жағдайын жақсартуға ықпал етеді. Ғылыми мақала панельдік тұрғын үй қорының проблемасына назар аударады және қазіргі қала құрылысы жағдайы үшін қажетті іс-шараларды ескере отырып, Қарағанды қаласының тарихи орталығында қайта құру жүргізу әдістері мен құралдарын ұсынады. Зерттеу нәтижелері қала жоспарлаушыларына, сәулетшілерге, инженерлерге және тұрғын үй кешендерін жаңарту және жаңарту саласында жұмыс істейтін басқа мамандарға пайдалы болуы мүмкін. Бұл талдау Қарағандының панельдік тұрғын үй қорына ғана емес, олардың тарихи-географиялық және қала құрылысы контекстін ескере отырып, басқа қалаларға да пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: сәулет; қайта құру; панельдік үйлер; Қарағанды; тарихи құрылыс.

Abstract. This scientific article is devoted to the study of the prospects for the reconstruction of the housing stock of the historical center of the city of Karaganda, represented by panel houses built in the period from the 1950s to the 1970s. The study analyzes the architectural features and technical condition of the houses, identifies the need for their modernization and adaptation to modern requirements of comfortable living. The article discusses various aspects of reconstruction, including the use of new technologies, materials and architectural solutions to improve energy efficiency, safety and convenience of residents. Reconstruction, as a complex of organizational and technical measures aimed at eliminating moral and physical deterioration of buildings as a whole or their individual elements and systems, includes modernization and renovation of the building infrastructure. It improves the quality of housing, helps to extend the service life, makes this housing stock relevant and in demand for people, and contributes to improving the condition of the main streets of the city. The scientific article draws attention to the problem of panel housing stock, and offers methods and tools for reconstruction in the historical center of the city of Karaganda, taking into account the necessary measures specifically for the current urban development situation. The results of the study can be useful for urban planners, architects, engineers and other specialists working in the field of renovation and modernization of residential complexes. This analysis can be used not only in relation to the panel housing stock of Karaganda, but also to other cities, taking into account their historical, geographical and urban planning context.

Keywords: Architecture; reconstruction; panel houses; Karaganda; historical buildings.

Introduction. Building reconstruction is a set of construction works and organizational and technical measures associated with changes in the main technical and economic indicators, functional purpose of the building, replacement of individual structures, carried out in order to improve living conditions, quality of service, and maximum elimination of physical and moral deterioration (SN RK 1.04-26-2011). Reconstruction allows to extend the operational life of the building, increase its energy efficiency, improve the general living conditions and aesthetic characteristics.

Many residential buildings have recommendations for operation, including reconstruction works. Typical panel construction built during the USSR period has a life cycle of 100 years with reconstruction every 25 years (Cheredina, Rybakova, 2017). Many countries of the former 'socialist camp', such as Germany, Estonia, Latvia, Lithuania, where similar series of panel houses were also common, have been carrying out reconstruction and renovation activities since the collapse of the Soviet Union. However, in Kazakhstan, no such reconstruction programs and standards have been introduced, apart from point-by-point works to improve the energy saving and aesthetic characteristics of individual panel houses.

In Karaganda also massively did not carry out such works on modernization of Soviet buildings, although almost the whole area of «New City» – the main administrative and cultural district of Karaganda – is represented by panel buildings of 1950-1970s. This is a typical housing stock of industrial method of construction, consisting of panel buildings of Khrushchev (1953-1964) and Brezhnev eras (1964-1982), which still has advantages in terms of location, cost of housing and relationship with the urban environment (Melikov, 1997). Based on the study of real estate objects in the city of Karaganda for 2020, the main specific weight of supply in the market is occupied by flats in typical industrial housing – «Khrushchevki» 1950-1970

years of construction – 47%. Panel houses make up 50% of the specific weight of the supply compared to 47% of brick houses, and the maximum specific price per square of housing is in the central part of the «New City» – 313.6 thousand tenge (Sihimbaev, Cherkasov, 2021). This indicates the continuing demand and interest of residents in typical panel housing in the historical development of Karaganda, from which the issue of reconstruction of such housing is relevant.

Among the most important problems of reconstruction of panel microdistricts of the «New City» we can highlight the need for major repairs, energy audit and sanitation of housing. This list includes modernization and renovation of structures and equipment with a high degree of wear and tear, increasing the level of energy saving and energy efficiency of buildings, adaptation of buildings for a wide category of citizens, including immobile groups, as well as the creation of a harmonious architectural and urban environment through the design code of streets or districts.

The purpose of this scientific article is to study the foreign experience in reconstruction of the panel housing stock, to highlight successfully used methods and solutions, and to describe the prospects of their application in the typical panel building of Karaganda. The object of the research is the methods and tendencies of reconstruction of typical panel houses; the subject of the research is the panel housing stock of the «New City» district of Karaganda.

Literature review. To date, there is a large amount of information review and theoretical data on the issues of reconstruction of typical industrial construction of the Khrushchev and Brezhnev eras. I.A. Prokofieva reviewed the history of development and construction of «Khrushchevka», as well as their condition and compliance with their current requirements for the convenience of living, energy efficiency and sanitation (Prokofieva, 2015). In her works it is noted that the reconstruction of panel houses is a justified and optimal solution in modern conditions. The methodology of reconstruction of the panel housing stock in Germany and the Baltic countries was considered in the studies of Meerovich M.G., Malko A.V., Kozlova L.V., Gladkova E.A. (Meerovich et al., 2017) and Kharicheva E.Ya. (Kharicheva, 2012). The adaptation of these methods in the CIS countries was proposed in the article «Russian practice of panel house building and German experience in reconstruction of typical industrial housing» (Cheredina I.S., Rybakova E.Y.), describing the possibility of applying the German experience in reconstruction taking into account national characteristics (Cheredina, Rybakova, 2017). Glebushkina L.V. and Peretolchina L.V. conducted a study on the issues of complex reconstruction of five-storey residential buildings of series 1-447 and 1-464 and the prospects of their compaction and decompaction (Glebushkina, Peretolchina, 2016) Such modernization techniques allow not only to change the volume-planning solutions of buildings, but also to improve the urban planning situation.

Architecture and panel building of Kazakhstan and Karaganda in particular was considered in the scientific works of Konobritskaya E. M. (Konobrickaya, 1954) and Samoilov K.I. (Samojlov, 2004), as well as in studies and articles by Tuyakaeva E.K., Danibekova E.T., Abdrasilova G.S., Onishchenko O.V. (Tuyakayeva A. et al., 2023), Verkhoturov V.F., Vinogradova T.V., Zolotareva L.R. (Verhoturov, Vinogradova, Zolotareva, 2014). They provide information on the history of typical industrial construction in Kazakhstan and Karaganda, and also note the need to improve the housing stock and adaptation to modern conditions.

The issue of improving energy-efficient qualities and modernization of the housing stock in the city of Karaganda was raised in the article «Modernization of reconstructed areas and transformation of urban planning approaches to the solution of modern urban environment» (Borisevich, Imanov, 2021), but from the point of view of only urban planning and reconstruction of the urban environment. They noted that the mass typical building of the Soviet time in Karaganda requires major repairs, sanitation and energy audit, as well as modernization

and renovation of structures. In this article, however, it is proposed to delve into the topic and consider the prospects of reconstruction of panel houses in Karaganda from the point of view of architectural, planning and engineering solutions.

Materials and research methods. The research and its methodology are based on a detailed analysis of the problem from different sides. In the course of the work a comprehensive approach was applied, including a variety of methods such as:

1. Analysis of theoretical information and historical data on the reconstruction of panel houses, statistical data on the improvement of building performance, advantages and disadvantages of conducting reconstruction programs on existing examples.

2. Analysis of archival and reference data with the study of historical development of the «New City» district of Karaganda, field survey of the panel housing stock of the city by means of photo-fixation.

Results and their discussion. As mentioned above, the panel housing construction was in demand not only in the CIS, but also in Europe, in particular, in Germany.

In 1990, the Federal Ministry of Construction carried out an analysis of the available panelized housing stock. The question about the nature of work with the buildings, demolition or improvement, was particularly relevant, since at that time one third of the population of East Germany lived in panel houses (Bake, 1999). In the course of work and research it was found that this type of housing was still necessary and had the potential for improvement.

One clear example is the project of architect Stefan Forster, a neighborhood in Linefelde, where seven neighborhoods came under redevelopment as part of the Eastern Renaissance initiative (Meerovich et al., 2017). The project utilised the original materials and structural elements of the buildings. The internal structure and layout of the flats was revised, the number of storeys was reduced, and terraces were provided on the roofs.

A six-storey panel block of flats, some of which were already empty, was transformed into a modern four-storey residential building. In the process of reconstruction, the height of the building was reduced by removing the top two floors, and the layout of the flats and balconies was revised, thus enlarging them. In addition to the building itself, the landscaping of the site has been revised and improved to reflect modern trends. (Figure 1)



Figure 1. The result of the reconstruction of panelized housing designed by Stefan Forster, Linefelde, Germany

Note – compiled by the website mediamall.ge, 2019

Renovation can be more radical, significantly transforming the appearance and functional features of a building. A good example is a 180-meter-long panel house that was transformed into individual apartment villas by Stefan Forster Architects. (Figure 2)



Figure 2. The result of the reconstruction of panelized housing designed by Stefan Forster Architects, Linefelde, Germany

Note – compiled by the website mediamall.ge, 2019

Seven segments were removed in a staggered pattern, thus forming eight individual houses, each of which also had one upper floor removed. Two facades are distinguished by a contrasting color scheme. On the east (blue) side of the building, a wall was left to unite the individual structures into a single complex. On the west side, there is a public space and open courtyards adjacent to the first floors. (Figure 3).



Figure 3. West side of panelized housing designed by Stefan Forster Architects

Note – compiled by the website mediamall.ge, 2019

As one of the main trends in German reconstruction experience, we can emphasize the desire to create a private individual space for residents in the form of a courtyard, and the organization of its relationship with the external, public space (Borisevich, Imanov, 2021) Stone masonry forms private gardens for the residents of the first floor and a buffer zone separating the territory of the house from the outside. (Figure 4)



Figure 4. Improvement of panel housing, Linefelde, Germany.

Note – compiled by the website mediamall.ge, 2019

The desire to form an open, but at the same time isolated space, both outside and inside the building itself, is evident in the principles of redevelopment. Barrier-free space has become a relevant and suitable solution as a housing solution, especially for the elderly and low-mobility groups, which are more common in post-war panel houses. Apartments became more spacious, free and comfortable for wheelchair mobility (Figure 5).

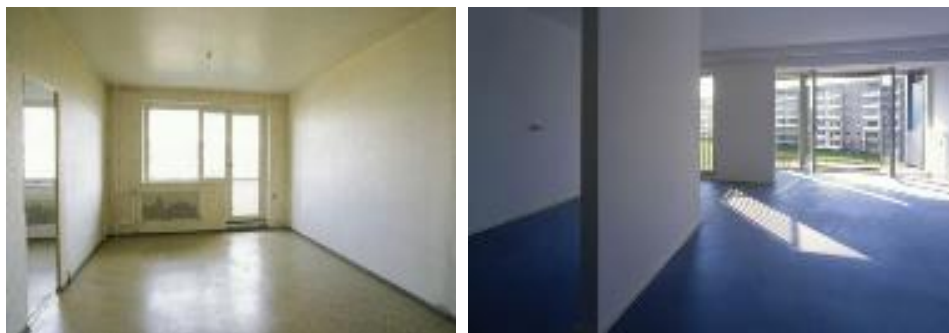


Figure 5. Result of redevelopment of a panel house apartment, Linefelde, Germany.

Note – compiled by the website mediamall.ge, 2019

Based on German experience, it can be concluded that “renovation” of existing five-storey residential buildings is cheaper and more affordable than building from scratch. Also, a peculiarity of reconstruction measures in Germany is to lower the number of storeys and reduce the number of apartments in the building, which is a bit contrary to the trends of modern architecture, which tends to high-rise buildings.

To improve the energy efficiency of an old building, various heat-insulating building materials are often used. Such measures were carried out in Vilnius, in the Zhirmunai district, as part of the program “Renewal of Housing Means Renewal of Vilnius” (Korotaeva, Malyar, 2018). It was first applied on a five-story panel house of the 1-464 series, which was common in all Soviet republics (Figure 6).



Figure 6. The result of reconstruction of a typical panel house of series 1-464 in the district of Zhirmunai, Vilnius, Lithuania

Note – compiled by I. Salnikov, 2013

As part of the program, before the repair works, a deterioration assessment and building rehabilitation studies were carried out. With 10-30% deterioration of load-bearing structures, which is a good indicator for further operation of the building, roof coverings, balconies, eaves, parapets, joints between panels, surface finish and stairs were badly deteriorated and needed repair. To improve the comfort of living and reduce heat losses, the basement was insulated

with EPS 100 expanded polystyrene foam laid at a depth of 600 meters, as well as the external walls and roof. Mineral wool boards with windproof film covered with finishing boards on a metal frame were used to insulate the walls. Similar boards were used to insulate the roof. The entrance doors were replaced with new ones, and all balconies were combined and converted into glazed loggias (Jakavičiūtė, 2005).

The reconstruction carried out in Lithuania has improved the temperature parameters of apartments, reduced heat losses by 1.7 times and reduced carbon dioxide emissions into the atmosphere (Lithuanian Hygienic Standard. HN 42:2004). In general, due to the reconstruction, the operational life of the building was increased, which favorably affected the quality of life in the apartments and their market value.

Despite the fact that energy efficiency improvement is the main objective in the modernization of old buildings, the most common method of reconstruction of panel buildings in the post-Soviet space is facade modification and renewal of cladding materials. Most often this comes from a lack of financial resources and the reluctance of tenants to radically change their own house. However, even in such cases, reconstruction can increase the comfort of living by improving the aesthetic characteristics of the building.

Architects from the GutGut bureau have remodeled the facade of one of the panel houses in the Slovak town of Rimavska Sobota. In addition to the addition of the upper floor, the facade finish was changed to a laconic gray plaster. The exterior design was improved with differently shaped window frames and accent steel balconies (Figure 7).



Figure 7. Result of the facade reconstruction of a panel house in Rimavská Sobota, Slovakia

Note – compiled by J. Skokan, M. Tůma, 2020

From the urban planning point of view, reconstruction can also be used as a tool for organizing the architectural appearance of the city and creating a design code. It can be carried out by “stylizing” the external appearance of buildings to a certain architectural style, corresponding to the historical context of the city. The project to recreate the historical development of Leningradsky Prospekt in Kaliningrad in the pre-war “Hanseatic” style was proposed by the Moscow Architectural Institute (MARHI) and architects I. Kiselev and A. Saranitz (Braune, Rau, 2000). Three of the twelve “Khrushchevs” proposed for reconstruction have already been modernized to improve energy efficiency: the upper floor was converted into an attic, the facades were insulated and finished with high-quality plaster ceramic clinker tiles under brick, which are characterized by durability and frost resistance (Figure 8).

The facades were also decorated with architectural details in the style of pre-war Kaliningrad and “brick gothic”. The roof was covered with ceramic tiles, the balconies on the main facade were made open with wrought iron fencing and glazed on the courtyard side. “Stylization” was complemented by decorative vases made of plastered concrete, arched window openings with capstone, decorative inserts with plant ornament (Korotaeva, Malyar, 2018).

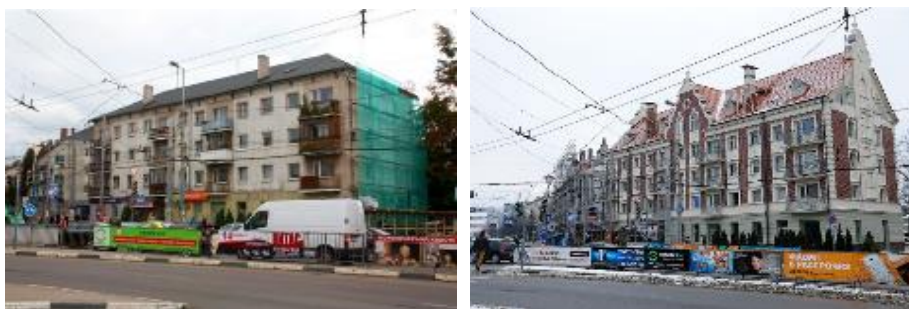


Figure 8. Result of reconstruction by “stylization” of house 2-4 on Leninsky Prospekt, Kaliningrad, Russia

Note – compiled by Capital Repair Fund for common property in apartment buildings in the Kaliningrad region, 2016

Despite the increase in aesthetic characteristics and tourist demand, the main disadvantage of such reconstruction is its attachment to a particular style, urban planning situation and design code of the district or street. Also, in «stylization» there is no reconstruction of engineering networks and the internal condition of the building, which has little effect on the improvement of living conditions.

Based on the studied experience in the reconstruction of panel houses, we can distinguish the following methods and techniques:

- Reducing the number of storeys of buildings: demolishing the upper floors and converting them into terraces, as well as combining the lower floors to create a single stylobate as a space for service and commerce.

- Redevelopment of premises: expansion of the number of rooms and space of apartments by reducing their number, which leads to an increase in the comfort of housing and adaptation to low-mobility groups.

- Repair and renovation of building structures: improving the energy efficiency and durability of the building by improving the insulation of walls, roofs, basements and attics, balconies, as well as reinforcing entrance groups and vertical communications.

- Improvement of aesthetic characteristics: repair and renovation of facades, color solutions, decorative elements, creation of a unified architectural style.

- Improvement of yard territories: creation of recreation zones, active and quiet recreation, organization of parking spaces, paths, sidewalks, landscaping systems.

These methods can be adapted and applied only taking into account the peculiarities of architectural heritage, the nature of the building, natural and geographical features of Karaganda and the social order of the city residents.

The history of the New Town area under consideration begins in 1930, with the development of the first general plan of Karaganda. The new administrative and cultural center of the city according to the plan of «Mosoblproekt» was planned to be built on the site of collective farm village Bolshaya Mikhailovka due to the need to create a high-rise city away from industrial enterprises and settlements of the Old City. Initially, brick residential buildings in the city were built in the «Stalinist» style according to the principles and methods of Russian classicism. During the period from 1936 to 1941, dozens of multi-storey residential buildings and large public facilities were built in the New Town. The main development of this territory was carried out by complex ensembles, according to a unified architectural plan. During the Second World War, the construction of high-rise buildings was reduced, increasing the housing stock was at the expense of low-rise construction. Since 1948, multi-storey building with houses of «Stalinist» style was resumed (Melikov, 1997).

In 1955, the Decree of the Central Committee of the CPSU and the USSR Council of Ministers «On the elimination of excesses in design and construction» prescribed simplicity, strictness of forms and economical solutions to provide each family with a separate apartment. In connection with this and with the beginning of the Karaganda house-building plant in 1959, a large-scale standard construction of prefabricated reinforced concrete, characterized by the simplicity of layouts, facades and cheapness of production. In the southern and southeastern part of the New City begin to build brick apartment buildings according to standard projects of series 447, developed in 1957-1959 by the institute «Giprogor», as well as panel «Khrushchevka» series 464 and 515, developed by the institute «Giprostroyindustriya» (Konobrickaya, 1954). The territories of the New Town began to be built up according to the micro-district system in the form of large residential areas with mid-rise houses of 4-5 floors, from 3 to 6 sections. (Figure 9).



Figure 9. Panel houses in Karaganda city, A - Series 1-464, B - Series 1-515

Note – compiled by the authors

These brick and panel houses are the most typical types of houses for the central part of the city, which, based on the short history of the city, represents the main part of the architectural heritage. Their service life has just begun to come to an end, so relatively recently the representatives of the state authorities have put forward ideas about preservation and possible reconstruction of important buildings for the history of the city. Before that, the main method of reconstruction applied by the local authorities was the renewal of engineering networks in the «South-East» area – Gulder, Stepnoy-2 and Kungei micro-districts, and the renovation of facades on the main streets of the city – Nursultan Nazarbayev Avenue (former Peace Boulevard), Abaya Street (former Lenin Street) and Bukhar Zhyrau Street (former Sovetskaya Street).

In 2019, the first project of renovation of the houses of the center of the «New City» along Ermekova, Gazaliev and Alikhanov Streets was proposed (EKaraganda.kz, 2024). The choice of this segment of the territory was obvious: the development of these streets is represented by brick «stalinkas» and panel houses of the mid-20th century series 1-464 and 1-515. The number of storeys varies from two-storey to three to five-storey houses. The apartment layouts are typical, the facades are decorated simply, in an aged gray, white and beige color scheme. All of them have similar problems that require reconstruction: outdated utilities, poor heat and noise insulation, roofs in need of repair, vertical communications, entrances and facades (Figure 10).

It is important that the renovation plans included not only the reconstruction of old houses, but also the demolition of dilapidated and emergency housing and its replacement with new construction. This was the main reason for the residents' indignation at the public hearings and in the framework of the social survey conducted by the Center for Social Design. The proposed project did not take into account the needs of the residents and did not guarantee careful reconstruction of the 1950s houses on Ermekova Street, which are of special value for

Karaganda, reflecting the peculiarities of industrial and national architecture. (Figure 11). There was also a distrust of the population to the quality of the proposed new housing instead of the proven and long-standing Soviet houses.



Figure 10. Panel and brick houses on Ermekova, Gazalieva and Alikhanov Streets

Note – compiled by the authors



Figure 11. Houses of the 1950s on Yermekova Street.

Note – compiled by the authors

This was not an isolated case, initiatives to implement the housing renovation program were raised further, as the issue remained relevant in the context of Karaganda. However, the opinion of the population about these works remained negative against the background of the lack of established dialog and incorrect informing of residents about the reconstruction process and its essence. In addition, according to residents, the expected result seemed abstract and incomprehensible due to the lack of a program, a clear work plan and uncertainty at the main stages of the organization of works.

In order to approve and start the reconstruction works, the consent of the majority of tenants was needed, the result of which could not be achieved. Thus, it can be concluded that the wrong strategy was chosen in terms of communication with the people. As an effective tool to convince people of the necessity and advantage of the reconstruction, a visual and intuitive sketch design with a demonstration of the intended result could have been used, which would have prompted a better understanding of the goals and expectations of the project as a whole.

Thus, in the panel construction of the 1950-1970s within the historical center of the city of Karaganda, the relevant items as part of the preliminary design, as well as general recommendations for consideration when working on the reconstruction of the housing stock are:

- Repair and modernization of load-bearing structural elements of the building: improvement of energy efficiency and durability of the building by improving insulation of walls, roofs, basements, attics and balconies, which includes thermal insulation, noise insulation, wind and moisture insulation, etc.

- Renovation and modernization of entrance groups and staircases

- Enhancement of aesthetic qualities: restoration and renovation of facades, selection of relevant and harmonious color solutions, decorative elements

- Creation and maintenance of a single harmonious architectural style within a district, neighborhood or ensemble of buildings.

- Improvement of comfortable courtyard territories: formation of recreation and recreational areas, parking spaces, children's and sports grounds, walking areas, sidewalks, as well as the organization of aesthetic and practical landscape.

Conclusion. The study showed that the reconstruction of panel houses from the 1950s to the 1970s in the historical center of Karaganda is an urgent task requiring an integrated approach. The technical condition of the buildings indicates the need for modernization, including increased energy efficiency, improved architectural appearance, redevelopment of residential premises and landscaping of adjacent territories. The analysis of foreign experience has demonstrated successful methods of reconstruction, such as reducing the number of floors, updating facades, adapting buildings for low-mobility groups of the population and the introduction of modern building materials.

The application of these solutions in Karaganda will not only extend the service life of the existing housing stock, but also preserve the historical appearance of the city, increase the comfort of living and improve the urban environment. It is important to take into account the opinion of residents and ensure effective cooperation with local governments for the successful implementation of renewal programs.

As a result of analysis and research of foreign realized projects on the topic of reconstruction of panel housing stock, as well as Karaganda experience in the organization of these works, it was possible to determine the main world trends and, on their basis, to make a list of recommendations for the main relevant and necessary solutions at the stages of proposal formation.

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

Acknowledgments. 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

- SN RK 1.04-26-2011. Rekonstrukciya, kapital'nyj i tekushchij remont zhilyh i obshchestvennyh zdaniy. – 2011.
- CHeredina I.S., Rybakova E.YU. Rossijskaya praktika panel'nogo domostroeniya i opyt Germanii po rekonstrukcii tipovogo industrial'nogo zhil'ya //Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU. – Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Tihookeanskij gosudarstvennyj universitet, 2017. – T. 1. – S. 402-407.
- Melikov, E.G. Goroda ne stroyatsya, oni sozdayutsya: etapy arhitekturno-planirovochnogo razvitiya goroda Karagandy (1930-1980). – Almaty; Karaganda, 1997. – 67 s.

- Sihimbaev M., Cherkasov M. Issledovanie ob"ektov nedvizhimosti po gorodu Karaganda //Bezopasnost' gorodskoj srede. – 2021. – S. 310-315.
- Prokof'eva I. A. Hrushchevki-snos ili rekonstrukciya: sovremennye tendencii // ZHilishchnoe stroitel'stvo. – 2015. – № 4. – S. 43-46.
- Meerovich M.G. i dr. Renovaciya panel'noj zastrojki 1960-1980-h gg. v Germanii //Izvestiya vuzov. Investicii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'. – 2017. – T. 7. – № 1 (20). – S. 111-119.
- Kharicheva E. YA. " Renovaciya" massovogo zhil'ya v pribaltijskom regione (Germaniya, Pol'sha, Estoniya, Latviya, Litva, Rossiya) // Dom Burganova. Prostranstvo kul'tury. – 2012. – № 3. – S. 17-30.
- Cheredina I.S., Rybakova E.YU. Rossijskaya praktika panel'nogo domostroeniya i opyt Germanii po rekonstrukcii tipovogo industrial'nogo zhil'ya // Novye idei novogo veka: materialy mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii FAD TOGU. – Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya Tihookeanskij gosudarstvennyj universitet, 2017. – T. 1. – S. 402-407.
- Glebushkina L.V., Peretolchina L.V. Rekonstrukciya zhilij zastrojki: uplotnenie ili razuplotnenie //Sistemy. Metody. Tekhnologii. – 2016. – № 3. – S. 182-191.
- Konobrickaya E.M. Karagandinskaya oblast' // Alma-Ata, Izd-vo Akad. nauk KazSSR. – 1954.
- Samojlov K.I. Arhitektura Kazahstana XX veka (razvitie arhitekturno-hudozhestvennyh form). – Moskva; Almaty, 2004
- Tuyakayeva A. et al. Regional identity in the architecture of residential buildings in the 1930s-1990s of the Karaganda city // Vestnik KazGASA. – 2023. – T. 4. – № 90. – S. 44-58.
- Verhoturov F.V., Vinogradova T.V., Zolotareva L.R. Istoriya i arhitekturnaya estetika Karagandy: novyj general'nyj plan goroda (posvyashchaetsya 80-letiyu Karagandy) // Aktual'nye problemy stroitel'stva, ekologii i energosberezheniya v usloviyah Zapadnoj Sibiri. – 2014. – S. 43.
- Borisevich YU.A., Imanov M.O. Modernizaciya rekonstruiruemym territorij i preobrazovanie gradostroitel'nyh podhodov k resheniyu sovremennoj zhilij srede // Arhitekturno-stroitel'nyj i dorozhno-transportnyj kompleksy: problemy, perspektivy, innovacii. – 2021. – S. 606-611.
- Bake O. i dr. Social'no orientirovannoe mestnoe upravlenie: opyt gorodov Germanii dlya Rossii= Sozial orientierte kommunalpolitik: Die erfahrung Deutscher städte als beispiel für Russland/pod red BM Grinchelya, NE Kostylevoj; Ros. akad. nauk. In-t soc.-ekon. problem, In-t Evrograd. – 1999.
- Braune U., Rau O. Der Altbau. Leinefelden-Echterdingen, 2000.
- Korotaeva E.A., Malyar V.V. Fasady i ih rekonstrukciya // Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik. – 2018. – № 6. – S. 200-200.
- Jakavičiūtė A. The programme „The renewal of dwellings means the renewal of Vilnius”. Nauja statyba, 3 (17), 2005. – P. 58-59.
- Lithuanian Hygienic Standard. HN 42:2004. Inner climate of residential and administrative buildings. Vilnius: Ministry of Health of Lithuanian Republic, 2004. – P. 12.
- EKaraganda.kz [Elektronnyj resurs] – URL: https://ekaraganda.kz/?mod=news_read&id=90795 (data obrashcheniya 30.07.2024).

Information about authors

Baymuratova Linara Tohirovna – master student of department of «Construction and building materials», Satbayev University, 22 Satpayev st., Almaty, Kazakhstan, E-mail: l.lin.b@mail.ru

Murat Tomiris Mukaramkyzy – master student of department of «Architecture», Satbayev University, 22 Satpayev st., Almaty, Kazakhstan, E-mail: henrytasmanheh@gmail.com

Maulenova Gulnara Djuparbekovna – Candidate of Architecture, Associate Professor of the Department of Architecture of the Institute of Architecture and Construction, Satbayev University, 22 Satpayev st., Almaty, Kazakhstan, E-mail: g.maulenova@satbayev.university

Kuatbayeva Togzhan Kuangalievna – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Construction and Building Materials", Satbayev University, 22 Satpayev st., Almaty, Kazakhstan, E-mail: aitzhanova.tokzhan@mail.ru

Bakirova Tarana Shaig – PhD-Doctor of Philosophy in Architecture, Head of the Department of Graphic and Media Design, Faculty of Design, Azerbaijan University of Architecture and Civil Engineering, 4 Aina Sultanova st., Baku, Azerbaijan, E-mail: taranabakirova@gmail.com

СӘУЛЕТ
АРХИТЕКТУРА
ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_275
IRSTI 67.07.03

A.M. Yessenbayev¹, A.A. Kornilova²

S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan

¹E-mail: yess.arken@gmail.com*

²E-mail: 5328864@mail.ru

**MODERN ASPECTS OF RESIDENTIAL ENVIRONMENT TRANSFORMATION
(ON THE EXAMPLE OF ASTANA)**

**ТҰРҒЫН ОРТАНЫҢ ЗАМАНАУИ ТРАНСФОРМАЦИЯЛАУ АСПЕКТІЛЕРІ
(АСТАНА Қ. МЫСАЛЫ НЕГІЗІНДЕ)**

**СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ЖИЛОЙ СРЕДЫ
(НА ПРИМЕРЕ Г. АСТАНЫ)**

Abstract. *The fundamental reason for progress has been the constantly changing lifestyle of man and his search for new solutions to change and improve the quality of life. In addition, dynamically developing scientific and technological progress in society has had a direct influence on architecture, urban planning and the environment of the city as a whole, today is no exception to this. Concurrently, socio-economic and urban planning factors exert a substantial influence on the formation and subsequent evolution of the residential urban environment. In the prevailing circumstances, these environments are compelled to adapt and adjust to the contemporary requirements of society.*

In contemporary urban environments, the residential context is characterized by perpetual transformation, demonstrating a high degree of flexibility and adaptability. This dynamic milieu encompasses a diverse array of typological elements, reflecting the distinct subject-spatial organization of specific urban zones or territories. Issues pertaining to the human living environment are inextricably intertwined with the social dimension, as they are fundamentally grounded in social principles. The social dimension of the living environment encompasses a range of issues at different scales and levels, integrating both local and strategic state-level objectives.

In the context of post soviet cities, the capital of Kazakhstan, Astana, is a notable example of a historically formed city with a diverse urban structure, characterized by a range of morphological types. This urban form has both advantages and disadvantages when assessed against modern standards.

The urban planning structure of Astana has undergone evolutionary-temporal, spatial-territorial, status-role periods, which influenced the nature of development and the formed environment in the future. This study is a continuation of a series of articles on the issues of transformation of the residential environment of Astana, aimed at studying the stages, factors and prognostic trends in the development of urban residential environment.

Keywords:: *living environment, transformation, adaptation.*

Аңдатпа. *Барлық уақытта прогрестің негізгі себебі адамның үнемі өзгеріп отыратын өмір салты және оның өмір сүру сапасын өзгерту мен жақсартудың жаңа шешімдерін іздеуі, сондай-ақ қоғамдағы қарқынды дамып келе жатқан ғылыми-техникалық прогресс болды, нәтижесінде сәулетке, қала құрылысына және жалпы қаланың қоршаған ортасына тікелей әсер етті және бүгінде бұл ерекшелік емес. Сонымен қатар, қазіргі жағдайда қоғамның қазіргі талаптарына бейімделуге мәжбүр болатын әлеуметтік-экономикалық және қала құрылысы факторлары тұрғын үй-қалалық ортаның қалыптасуы мен одан әрі дамуына жеткілікті әсер етеді.*

Бүгінгі күні, қалалық тұрғын орта бұл белгілі бір аймақтың немесе қалалық құрылымның аумағының нысанды-кеңістіктік ұйымдастыруының әртүрлі масштабты типологиялық элементтерін қамтитын үнемі өзгеріп отыратын, икемді және бейімделетін кеңістік. Адамның тіршілік ету ортасына қатысты мәселелер әлеуметтік фактормен тығыз байланысты, себебі олардың әлеуметтік негізі бар. Тұрғын үй ортасының әлеуметтік мазмұны жергілікті атқарушы деңгейде де, стратегиялық мемлекеттік деңгейде де өзекті мақсаттар мен міндеттерді біріктіре отырып, әртүрлі көлемдегі және деңгейдегі мәселелерді қамтиды.

Посткеңестік кеңістіктегі әрбір тарихи қалыптасқан қала сияқты, Қазақстанның астанасы Астана да морфологиялық типтері бар, заманауи шаралар бойынша өзінің артықшылықтары мен кемшіліктері бар әртүрлі құрылыстары бар тарихи қалыптасқан қала-құрылыс құрылымына ие.

Астананың қала құрылысы құрылымы эволюциялық-уақытша, кеңістікті-аумақтық, мәртебелік-рөлдік кезеңдерді бастан өткерді, бұл кейіннен құрылыстың сипатына және қалыптасатын ортаға әсер етті. Бұл зерттеу Астана тұрғын үй ортасын трансформациялау мәселелері туралы мақалалар сериясының жалғасы болып табылады және қалалық тұрғын үй ортасының даму кезеңдерін, факторларын және болжамды үрдістерін зерттеуге бағытталған.

Түйін сөздер: тұрғын орта, трансформация, бейімделу.

Аннотация. Во все времена основополагающей причиной прогресса был постоянно изменяющийся образ жизни человека и его поиски новых решений изменения и улучшения качества жизнедеятельности, а также динамично развивающийся научно-технический прогресс в социуме, что в результате непосредственно оказывало влияние на архитектуру, градостроительство и окружающую среду города в целом, и сегодня это не является исключением. Вместе с этим достаточное влияние на формирование и дальнейшее развитие жилой городской среды оказывают социально-экономические и градостроительные факторы, которые в нынешних условиях вынуждены приспособливаться и адаптироваться под современные требования общества.

Сегодня, жилая городская среда это постоянно видоизменяющееся, гибкое и адаптируемое пространство, содержащее в себе разномасштабные типологические элементы предметно-пространственной организации определенной зоны или территории городской структуры. Вопросы имеющие отношения к среде обитания человека неразрывно связаны с социальным фактором, так как имеют социальную основу. Социальное содержание жилой среды охватывает вопросы разного масштаба и уровня, объединяя актуальные цели и задачи как на местном исполнительном уровне, так и на стратегически государственном.

Как и каждый исторически сложившийся город на постсоветском пространстве, столица Казахстана Астана имеет исторически сформировавшуюся градостроительную структуру, которая имеет разнообразную застройку с морфологическими типами, со своими преимуществами и недостатками по современным меркам.

Градостроительная структура Астаны перенесла эволюционно-временные, пространственно-территориальные, статусно-ролевые периоды, которые повлияли на характер застройки и формируемой среды в последующем. Данное исследование является продолжением серии статей о вопросах трансформации жилой среды Астаны, направленные на изучение этапов, факторов и прогностических тенденций развития городской жилой среды.

Ключевые слова: жилая среда, трансформация, адаптация.

Introduction. Today, the trends of development and transformation of any modern city are continuously connected with the formation of an optimal environment for comfortable living and safe performance of all life processes of the population (Yessenbayev et al., 2024). The primary task of urban planning and architectural and design activity in general, is the formation of the environment of planned organization for its more rational development. The global practice of actual environmental design has changed its approach and now it is distinguished by a special socio-cultural aspect, as modern trends in urban planning and housing design, organization and planning of residential and public spaces take into account the needs of all categories of citizens and strive for their adaptation in new or already formed spaces and territories. However, it should be understood that over time, in the conditions of stable development of socio-economic and scientific-technical potential of society, the concepts of comfort will change in the direction of increasing the requirements of housing consumers, as it is a constantly changing phenomenon (Chaly & Kornilova, 2024).

Astana, as a dynamically developing and open to new solutions, is actively forming comfortable urban spaces both in new and historically established public and residential areas. At the same time, there are urgent tasks that require immediate intervention and solution, as the dynamic pace of development of territories does not always meet design, artistic and expressive and moral and ethical requirements.

The purpose of this study is to analyse the existing situation of residential environment, to identify its advantages and disadvantages, comparative analysis, as well as the hypothesis of the work is classification, identification of comfort indicators, as well as prognostic trends in the formation and further development of residential environment and residential development with different morphological structure.

This article considers the works of foreign and domestic scientists, views of professional specialists, architects and urban planners. However, despite a significant number of publications, many issues of residential environment formation and its transformation in modern conditions are still insufficiently researched, in particular, the concept of comfort of residential environment and its components, the dependence of residential environment formation on the general plan, changes in the status of the city and its functional organization, changes in socio-economic conditions in a particular territorial unit are not sufficiently disclosed.

Materials and methods. This article considers the current state of the housing environment in the context of the development of the general plan of Astana city. The research methodology applied by the authors is based on the consistent comprehensive consideration of the solution of the problem. In the process of work the complex approach including several methods of research was applied:

1. Method of studying archival data, scientific publications of domestic and foreign researchers, scientific and educational literature, regulatory and technical base. Identification of established theoretical concepts and scientific approaches within the research. At the initial stage of this study, the collection of material was carried out, showing the step-by-step development of the residential environment and the general plan of Astana;

2. Method of statistical analysis. Referring to official data from open sources, the statistical method allowed to collect, analyze and summarize data on the population and housing stock, for the last 5 years.

3. Method of generalization of results. In connection with the scale of this study in the final stage is carried out generalization and clarification of the results obtained.

Results and their discussion. Separate residential buildings, groups of residential buildings and complexes form the main form-forming volumes of the city, being the dominant structure of the residential zone they create compositional unity and integrity of residential development. Groups of residential formations and neighborhoods combine elements of necessary social and domestic services, their environmental content is aimed at optimally favorable conditions for the organization of life activity of the population (Manahasa & Manahasa, 2020).

At all times, the living environment has had a close connection with the way of life of man, as by nature it is an artificially created space by him himself. (Vyrlan, 2016). The human habitat, i.e. the external living environment, is a combination of complex social systems and cultural relations where many processes of social life intersect. The timeline shows the evolutionary stages of residential environment development, where the attitude of designers to the consumer was clearly formed. The modern approach of post-industrial society to the formation of living environment emphasizes the consideration of the basic requirements of the human being, making him a participant of the created dynamic structure (Sonyak, 2020).

Nowadays, the issues of forming a comfortable residential environment are of particular interest not only to architects and urban planners, but also to landscape designers, construction companies, sociologists, psychologists and public figures, as this space has a direct impact on existing and erected housing, final pricing, the comfort of the population and the surrounding urban environment as a whole (Generalov & Generalova, 2015). In architectural science, the concept of living environment has a wide range, the scope of which starts from the residential cell and ends with the general plan of the city. However, it should be noted that there is still no clear concept and definition of the comfort of the living environment and its forming components, so

different specialists understand it in their own way, which is probably one of the reasons for the organization of the living environment at a satisfactory level (Yessenbayev et al., 2024).

In modern domestic and foreign architectural and urban planning theory and practice there is a great experience of urban environment design, which differs absolutely cardinal techniques and methods of design, hypotheses and paradigms in different time periods (Abdrasilova & Danibekova, 2021). The existing experience in the development of territories with objects of different functional purpose, scale and volume, organization of comfortable living conditions for the population allows to create the necessary comfortable living environment, but at the same time a number of significant omissions are allowed, the results of which are formed in unforeseen directions and volumes of development objects that do not correspond to the approved and current urban planning projects, which include the general plan, detailed planning project and project (Yarmosh, 2014).

Currently, according to the official statistical data of the Bureau of National Statistics of the Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan, the area of the territory is 79.5 hectares, and the population of the city in 2024 is about 1.5 million people (Fig. 1).

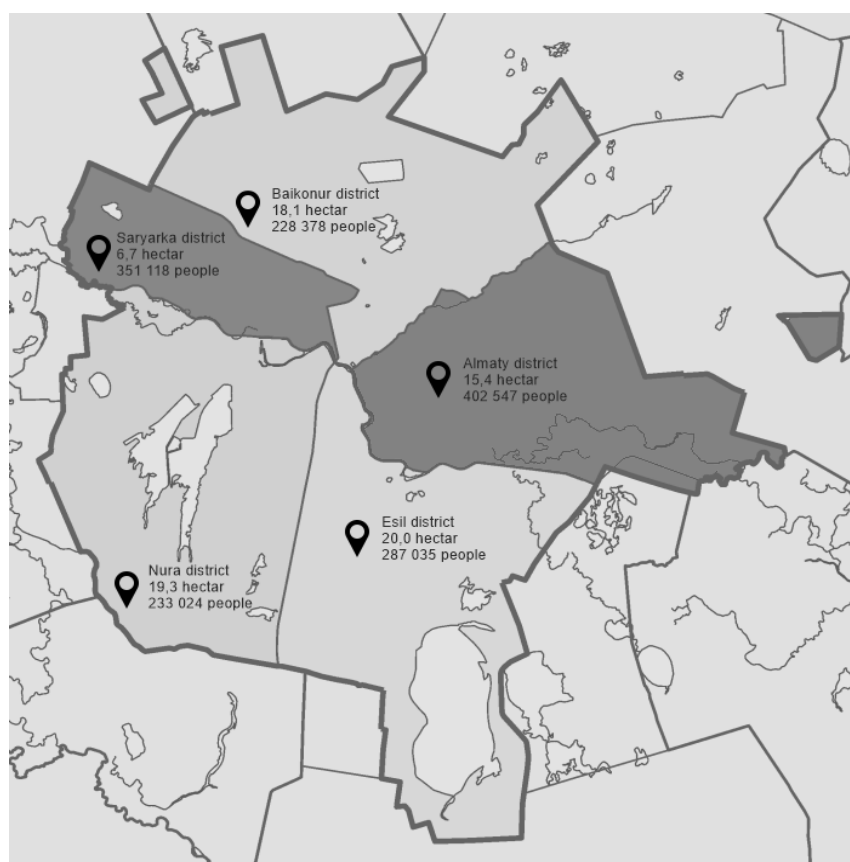


Figure 1. Map of Astana

Note – compiled by the authors (Yessenbayev, 2024)

Spatial and territorial development of the city is regulated by a number of normative documents in the field of architecture and urban planning, as well as by local executive bodies (Schreyer et al., 1981). Prospective development of the capital is carried out in accordance with the general plan, which is the main document for planning the urban development of Astana in

order to create a favorable living environment and sustainable development of the city, ensuring environmental safety, preservation of nature and cultural heritage (Makhmetova et al., 2022).

Today Astana is a promising and dynamically developing city with a progressive level of urbanization. Geopolitical status of the capital, global and state economic instability is a significant cause of external and internal labor, educational and regional migration, outflow of population from rural areas and their concentration in the city, as a result of which all this has led to a high demand for housing. Today, the housing stock of the capital city is progressively growing and is built up as a rule with multi-storey residential buildings and complexes, forming a high-density development (Fig. 2). The population density of the city in 2024 is 1839.63 people/km².

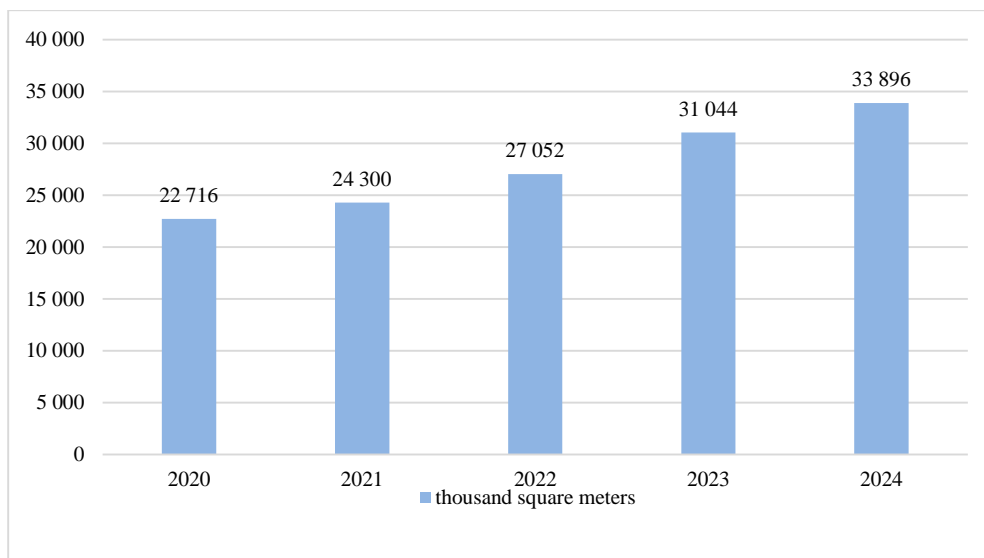


Figure 2. Total area of Astana's housing stock

Note – compiled by the authors

One of the main goals of the development and transformation of the city is to eliminate the disproportion in the comfort of living, in particular, in terms of housing stock. Thus, the capital has adopted the indicator of housing stock provision of 30 m² per person, and to achieve this level of comfort of living it is planned to increase the housing stock to 68250 thousand m², which accordingly implies to follow the process of formation and improve the quality of the future residential environment.

The main task of urban planning is the formation of volumetric and spatial organization of the territorial development of the settlement, the spatial content of which has a medium diversity, that is, the development of territories with elements of different morphological type (Jóźwik, 2024). Astana has a tendency to develop the development of high-density multi-storey residential buildings, without taking into account a number of features, such as the gradation of storeys depending on the location in the structure of the city, morphological types of development of residential neighborhoods, which predetermine the density of the area, the increase in recreational and leisure areas, developed social infrastructure. Also important is the development of individual territories, which are built according to the established classification of housing comfort, which in consequence will lead to negative consequences, such as disunity and social stratification of society, the tendency to form territories with more detailed development and infrastructure.

Today, the dynamic processes of urbanization and active development give rise to the following problems, which are relevant not only for Astana, but also for other major cities of the Republic of Kazakhstan as a whole:

- point development, as well as development not corresponding to the established urban planning projects of the city;
- non-compliance with the principles of established urban planning regulations and design code of the city;
- insufficiently developed level of social, engineering and transportation infrastructure in the new territories;

Conditioned by the regulatory restrictions of approved and existing urban planning documents, the urban territories of Astana have only two main spatial-territorial development – horizontal and vertical development (Kornilova et al., 2022). Thus, the demand for vacant inner-city territories is increasing, where dense high-rise point development takes place. Naturally, there are currently a number of regulatory documents to regulate the density limits, but the reality does not always correspond to them.

Point multi-storey development is the most popularly practiced type of development, most often in the form of single-section tower-type houses. Nowadays, on the one hand, it has positive solutions in the form of development of vacant free territories; the possibility of project realization in conditions of a small land plot; construction on the partially demolished territory of emergency housing or garden societies, forming a new image of modern architecture and residential formations. A separate advantage is a rare but successful integration into the existing development, which does not violate the established compositional and artistic unity and integrity of the construction area.

However, it should be noted about the presence of negative (negative) consequences of point development, which include the following indicators:

1) violation of compositional integrity and visual connection of the established development. Development of the territory with an object that does not correspond to the surrounding environment in terms of number of storeys, scale, architectural appearance and so on, which violate the visual unity of the existing environment.

2) displacement of socially vulnerable strata of the population to the outskirts of the city, which is caused by the demolition of obsolete and emergency housing, as well as garden societies, which were the only dwellings of citizens. The resulting unfair and not corresponding to the real estate market compensation amount does not provide an opportunity to purchase decent housing in a favorable area of the city. As a result, citizens are forced to consider less comfortable conditions, buying housing on the outskirts of the city, where most often the level of comfort, improvement and safety is at an unsatisfactory level. This also includes inexpensive rental housing, which attracts migrant workers. The lack of proper, first of all, social and infrastructure in the emerging peripheral areas creates social tension, forcing residents to travel long distances on a daily basis.

3) As a result of all of the above, there is a high risk of environmental degradation, where zones with unregulated chaotic development, decline of all types of infrastructure, increase in the level of criminalization are formed, which together have a negative impact on the level of comfort and livelihood of the population of the territory and the city as a whole.

The opposite of point development is neighborhood development, which is now widely practiced in many countries and is increasingly attracting the interest of construction companies and consumers. Unlike point development, neighborhood development has the following volumetric and spatial characteristics:

1) feelings of comfort and security of residents, due to the perimeter and enclosed development. Delimitation of private and common gives an opportunity to develop internal yard recreation, minimize the formation of through pedestrian and carriageways;

2) clear definition of the boundary of residential and public zones. Residents visually determine the boundaries of public and residential zones;

3) development of social infrastructure on the outer perimeter, which gives the opportunity to conduct commercial activities without prejudice to the residents of residential buildings;

4) placement within certain boundaries or streets, makes it possible to carry out gradation of development, as each quarter will be perceived as an integral residential formation.

It should also be understood that the modern transformation of the residential environment is a complex system of architectural and urban planning tasks, which combine multi-scale and multi-dimensional goals. Transformation processes at the modern stage should start with a reasonable functional planning and organizational structure, take into account the natural scale, proportions, coloristic solutions of forms, developed landscaping and infrastructure, which as a result should meet the requirements of all categories of the population (Olczak et al., 2022). The development of a comfortable living environment, as well as in its design, is constantly influenced by the following set of factors, ignoring which in modern practice is inadmissible:

- urban planning;
- natural-climatic;
- socio-economic;
- cultural-historical;
- ecological;
- functional-planning;
- psychological.

Integration of the residential environment with the existing or emerging space, taking into account landscape, inclusive, engineering and technical means, as well as discussion of topical issues with the population, making it a co-participant in the design process, should become a new and natural method of design (Belmahdi & Djemili, 2022).

Conclusions. Based on the above, the study has established the following conclusions:

1. In order to form a multi-scale environment, it is necessary to use a building with variable storeys, which would not create the effect of confinement.

2. The expressiveness of facade solutions, their coloristic solution and materials used should be different and not create a monotonous volume. Exclusion of visual interference, compliance with the principles of the design code of the city.

3. Detailed and qualitative development of recreational and green areas. Variability landscape organization and landscaping, small forms, lighting.

4. Development should be carried out taking into account the psychological and visual aspects of human perception.

5. The urban structure has indicators of density in each specific area, and taking into account the individual indicators of a particular area, the city should be zoned and establish regulations on morphological types of development, which will create variability of design solutions.

Summarizing the above, it is worth noting the scale of the residential environment, which should take into account a number of local features when forming in certain areas. This study considers the task in the urban planning aspect on the example of a specific urban planning unit. In the future, the authors aim to continue the series of articles devoted to the study of residential environment, its current trends and transformations, focusing on specific and limited areas.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments. This study was performed at the authors' expense.

“Notification of the use of generative AI and technologies using it during the writing of the manuscript”. These technologies were not used in the preparation of this paper.

References

- Yessenbayev A., Musabayev T., Kornilova, A., & Chekaeva, R. (2024). Aspects of the historical transformation of the residential environment (based on the example of Astana city). *Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University Technical Science and Technology Series*, 149(4), 145–161. <https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-149-4-145-161>
- Chaly S. & Kornilova A. (2024). Features of architectural environment formation: A case study of public spaces in the regional context of Northern Kazakhstan. *Architectural Studies*, 10(2), 191-204. <https://doi.org/10.56318/as/2.2024.191>
- Manahasa E. & Manahasa O. (2020). Defining urban identity in a post-socialist turbulent context: The role of housing typologies and urban layers in Tirana. *Habitat International*, 102, article number 102202. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2020.102202>
- Vyrlan A.I. (2020). Transformation of elements of modern urban environment. Yekaterinburg: UralSUAA.№22, PP. 131-135 // Vyrlan A.I. (2016). Transformacii elementov sovremennoj gorodskoj sredy. Ekaterinburg: UralGAKhA.№22, 131-135
- Sonyak E.V.(2020). Factors of formation of modern residential environment. Yekaterinburg: UralSUAA.№22, PP. 119-127 // Sonyak E.V.(2020). Faktory formirovaniya sovremennoi zhiloi sredy. Ekaterinburg: UralGAKhA.№22, 119-127
- Generalov V.P & Generalova E.M. (2015). Problemy klassifikatsii komfortnoi zhiloi sredy pri sozdanii sovremennoi gorodskoj zastroi. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, № 5 (180)
- Yessenbayev A., Akhmetshin E., Kurikov V., Hajiyev H., Chernova O., Litvinov A., Shichiyakh R, Alkhanov N. (2024). Application of the Adaptive Approach for Forming the Concept of an Inclusive Residential Environment in the Context of Regional Differences. *Civil Engineering and Architecture*, 12(5), 3480 - 3499. <https://doi.org/10.13189/cea.2024.120526>
- Abdrasilova G. & Danibekova E. (2021). The transformation of modern architecture in Kazakhstan: from soviet "internationalism" to a post-soviet understanding of the regional identity. *Spatium* 46,pp.73-80. <https://doi.org/10.2298/SPAT2146073A>
- Yarmosh T.S. (2014). Sociocultural functions of residential environment. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.* (4), PP. 23-27. // Jarmosh T.S. (2014). Sociokul'turnye funktsii zhiloi sredy. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta im. V.G.Shuhova*, (4), 23-27.
- Schreyer, R., Jacobs, G. R., & White, R. G. (1981). Environmental meaning as a determinant of spatial behaviour in recreation.
- Makhmetova L., Kuzin V., Makhmetova N., Iztleuova D. & Alles E. (2022). Master plan of Astana city up to 2035 "Baseline scenario of the state of environment in Astana city and forecast of its changes up to 2035". Astana: United Nations Development Programme. // Makhmetova L., Kuzin V., Makhmetova N., Iztleuova D. Alles E. (2022). General'nyj plan razvitiya goroda Astany do 2035 goda "Bazovyj scenarij sostojanija okruzhajushhej sredy v gorode Astana i prognoz ego izmenenij do 2035 goda". Astana: Programma razvitiya OON.
- Jóźwik, R. (2024). Architectural and Urban Changes in a Residential Environment - Implications for Design Science. *Sustainability*, 16(10), 3987. <https://doi.org/10.3390/su16103987>
- Kornilova, A.A., Mamedov, S.E.O., Karabayev, G.A., Khorovetskaya, Y.M., Lapteva, I.V. (2022). Identification of Regional Factors Affecting Management of Territories: Formation of Residence and Social Infrastructure System in Urban and Rural Settlements in Kazakhstan *Journal of Environmental Management and Tourism*, 13(8), pp.2248–2254 [https://doi.org/10.14505/jemt.13.8\(64\).17](https://doi.org/10.14505/jemt.13.8(64).17)
- Olczak B., Wilkosz-Mamcarczyk M., Prus B., Hodor K. & Dixon-Gough R. (2022). Application of the building cohesion method in spatial planning to shape patterns of the development in a suburban historical landscape of a "village within Kraków". *Land Use Policy*, 114, article number 105997. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.105997>
- Belmahdi S. & Djemili A. (2022). Urban landscape structure anatomy: Structure patterns and typology identification in the space-time of Setif City, Algeria. *Frontiers of Architectural Research*, 11(3), 421-439. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2021.12.004>

Information about authors

Yessenbayev Arken – PhD candidate, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, E-mail: yess.arken@gmail.com ORCID: 0009-0002-5822-2602, +7 702 929 97 25

Kornilova Alla – Doctor of Architecture, Professor, S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana, Kazakhstan, E-mail: 5328864@mail.ru ORCID: 0000-0002-1852-0712

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_283
MPHTI 67.13.51

Т.В. Жусупов¹, Е.Б. Утепов¹, А. Анискин², А.К. Алдунгарова³, С.А. Караулов⁴

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
E-mail: timurvictorovich@gmail.com

E-mail: utepov-elbek@mail.ru*

²Университет Север, Вараждин, Хорватия

E-mail: aaniskin@unin.hr

³Кокшетауский университет имени Шокана Уалиханова, Кокшетау, Казахстан

E-mail: liya_1479@mail.ru

⁴ТОО «Solid Research Group», Астана, Казахстан

E-mail: karaulovsabit1997@gmail.com

**СПОСОБ ПРОСТРАНСТВЕННОГО АНАЛИЗА
ПЛОТНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ КАК ФАКТОРА ПЛАНИРОВАНИЯ РЕНОВАЦИИ
И РЕКОНСТРУКЦИИ ЖИЛЬЯ В ГИС**

**ГАЗ-ДА ТҰРҒЫН ҮЙДІ ЖАҢҒЫРТУ ЖӘНЕ ҚАЙТА ҚҰРУДЫ
ЖОСПАРЛАУ ФАКТОРЫ РЕТІНДЕ ХАЛЫҚТЫҢ ТЫҒЫЗДЫҒЫН
КЕҢІСТІКТІК ТАЛДАУ ӘДІСІ**

**METHOD OF SPATIAL ANALYSIS OF POPULATION DENSITY
AS A FACTOR IN PLANNING RENOVATION AND RECONSTRUCTION
OF HOUSING IN GIS**

Аннотация. Статья посвящена разработке способа пространственного анализа плотности населения как фактора планирования реновации и реконструкции жилого фонда в ГИС. В рамках исследования выявлена недостаточная эффективность текущих подходов, применяемых в Казахстане для оценки и планирования сноса ветхого жилья, что обусловлено отсутствием интеграции многокритериального анализа. На основе данных города Астана за период 2003-2023 гг. предложен новый методологический подход, включающий использование программного обеспечения ArcGIS для моделирования и репрезентации плотности населения. Разработанная модель состоит из восьми операций, начиная с выделения жилых зданий (площадь полигонов от 50 до 10 000 кв.м) до создания растровых карт плотности населения с применением инструмента Kernel Density. Прогноз численности населения на 2024-2029 гг. показал рост от 1 425 740 до 1 852 552 человек, а объем ввода жилья увеличится с 2,85 до 3,31 млн кв.м. На основе этих данных создана карта прогнозируемой плотности населения, где выделены зоны высокой плотности, такие как район Байконур. Полученные результаты свидетельствуют о значительных изменениях плотности населения в центральных районах города, что важно учитывать при планировании реновации. Преимущество модели заключается в её способности интегрировать данные о численности населения и вводе жилья в эксплуатацию с пространственными характеристиками зданий. В то же время её точность может быть увеличена за счет добавления данных об этажности зданий и реальном числе проживающих. Предложенный методологический подход может быть использован для планирования реновации в других городах, где наблюдается интенсивная урбанизация и дефицит современного жилья.

Ключевые слова: реновация, ветхое состояние здания, геоинформационная система, плотность населения, прогнозная модель.

Аңдатпа. Мақала ГАЗ-да тұрғын үй қорын жаңғырту мен қайта құруды жоспарлауда маңызды бір факторы ретінде халықтың тығыздығын кеңістіктік талдау әдісін өзірлеуге арналған. Зерттеу шеңберінде Қазақстанда тозығы жеткен тұрғын үйді бұзуды бағалау және оны

жоспарлау үшін қолданылатын ағымдағы тәсілдердің тиімділігінің жеткіліксіздігі анықталды, бұл көп өлшемді талдаудың интеграциясының болмауына байланысты екенін көрсетеді. Бұл мақалада Астана қаласының 2003-2023 жылдар кезеңіндегі деректері негізінде халықтың тығыздығын модельдеу және бейнелеу үшін ArcGIS бағдарламалық қамтамасызды пайдалануды қамтитын жаңа әдіснамалық тәсіл ұсынылды. Зерттеуде әзірленген модель тұрғын үйлерді бөлуден бастап (50-ден 10 000 шаршы метрге дейінгі көпбұрыштардың ауданы) Kernel Density деген құралын қолдана отырып, халықтың тығыздығының растрлық карталарын құруға дейінгі сегіз операциядан тұрады. 2024-2029 жылдарға арналған халық санының болжамы 1 425 740-тан 1 852 552 адамға дейін өсуді көрсетті, ал тұрғын үйді іске қосу көлемі 2,85-тен 3,31 млн шаршы метрге дейін ұлғаяды. Зерттеуде алынған нәтижелер қаланың орталық аудандарындағы халық тығыздығының айтарлықтай өзгеруін көрсетеді, бұл жаңғыртуды жоспарлау кезінде ескеру қажеттігін білдіреді. Модельдің артықшылығы – оның халық саны мен тұрғын үйді пайдалануға беру туралы мәліметтерді ғимараттардың кеңістіктік сипаттамаларымен біріктіру мүмкіндігі болып табылады. Сонымен қатар, оның дәлдігін ғимараттардың қабаттылығы мен тұрғындардың нақты саны туралы мәліметтерді қосу арқылы арттыруға болатыны талқыланды. Ұсынылған өдістемелік тәсілді қарқынды урбанизация және қазіргі заманғы тұрғын үй тапшылығы бар басқа қалаларда жаңғыртуды жоспарлау үшін пайдалануға болады.

Түйін сөздер: Жаңғырту, ғимараттың тозығы жеткен жағдай, геоақпараттық жүйе, халықтың тығыздығы, болжау моделі.

Abstract. This article presents a method of spatial analysis of population density as a factor in planning the renovation and reconstruction of residential buildings in GIS. The study identifies inefficiencies in the current approaches used in Kazakhstan for assessing and planning the demolition of dilapidated housing, caused by the lack of integrated multi-criteria analysis. Based on data from Astana city for the period of 2003-2023, a new methodological approach is proposed, employing ArcGIS software for modeling and representation of population density. The developed model consists of eight operations, ranging from the selection of residential buildings (polygon areas between 50 and 10,000 sq.m) to the creation of raster maps of population density using the Kernel Density tool. Population forecasts for 2024–2029 indicate growth from 1,425,740 to 1,852,552 people, with housing construction volumes increasing from 2.85 to 3.31 million sq.m. Based on this data, a forecasted population density map was created, highlighting high-density zones such as the Baikonur district. The results show significant changes in population density in the city's central areas, which should be considered when planning renovations. The model's advantage lies in its ability to integrate population and housing data with spatial building characteristics. At the same time, its accuracy can be enhanced by adding data on building heights and the actual number of residents. The proposed methodological approach can be applied to urban renovation planning in other cities experiencing rapid urbanization and a shortage of modern housing.

Keywords: Renovation, dilapidated building condition, geoinformation system, population density, prediction model.

Введение. 23 сентября 2022 г. Постановлением Правительства Республики Казахстан была утверждена Концепция развития жилищно-коммунальной инфраструктуры на 2023-2029 гг. (Смаилов, 2022). В рамках данного документа одной из реформ является обновление жилищного фонда через осуществление сноса аварийных и ветхих домов и реализацию проектов программ реновации жилищного фонда. После чего практически во всех городах РК были утверждены программы реновации жилищного фонда (Смаилов, 2023; Сагинтаев, 2021; Сыздықбеков, 2024; Омар, 2024; Нурсагатов, 2023; Тналиев, 2024; Ахметов, 2022; Телгараев, 2022; Файса, 2023; Таурбеков, 2022; Темирханов, 2022). В документах указаны задачи программы, первой из которых выступает реновация или ликвидация аварийного (ветхого) жилья. В некоторых программах сформирован план по сносу аварийного жилья с указанием количества зданий под снос ежегодно (Смаилов, 2023). В механизмах реализации программ имеются пункты по определению районов и этапов реконструкции, но не указывается четкая методология. Традиционно эти вопросы решаются местными исполнительными органами (акиматы) и их уполномоченными организациями путем проведения технического обследования на основании степени износа или паспортизации (Смаилов, 2023; Сагинтаев, 2021; Сыздықбеков, 2024; Омар, 2024; Нурсагатов, 2023; Тналиев, 2024; Ахметов, 2022; Телгараев, 2022; Файса, 2023;

Таурбеков, 2022; Темирханов, 2022). Практика показывает неэффективность и недостаточную обоснованность текущих подходов в отнесении зданий к категории ветхого и подлежащих к сносу, влекущих волнения жителей этих домов (Адамбусинова и др., 2020; Сарсембаева, 2023; Фролова, 2023; Захарова, 2023; Турар, 2024; KAZAKHSTAN TODAY, 2024; Ахметов, 2024). Например, в нашем предыдущем исследовании (Zhussupov et al., 2022) мы поднимали вопрос первостепенности конкретизации понятия «ветхое здание» и их критериев. Надо отметить, что речь идет о тысячах географических объектов разноудаленных друг от друга с множеством технических параметров, влияющих на принятие решений. Очевидно, что анализ такого количества данных в обычных офисных ПО (например, Excel), являясь трудоемким, создает немало неточностей. Это указывает на необходимость кардинальных изменений текущей методологии реновации и применения специализированных ПО и подходов многокритериального и многофакторного анализа. Лучшие практики (Omidipoor et al., 2019; Kah & Alain, 2021) показывают, что применение геоинформационных систем (ГИС) и моделей пространственного анализа способствует оптимизации процессов реконструкции зданий и реновации городской среды, однако требуют специфически обработанных исходных данных. В ряде зарубежных источников имеются примеры применения ГИС совместно с методами многокритериального принятия решений для планирования сноса и реновации (обновления) зданий (Morckel, 2017; Wang & Yang, 2022; Foroughi & Rasol, 2016). В данных исследования в качестве факторов, влияющих на планирование, принимались: вакантность участка, потенциал района, характеристики здания, уровень преступности, архитектурный статус здания, историческое значение здания, материал каркаса, возраст здания, плотность застройки и др. Однако в исследованиях не учитывается такой фактор, как плотность населения. При этом программа Организации Объединённых Наций по населённым пунктам (UN-Habitat) в 2014 г. предложила в качестве одного из принципов устойчивого планирования городов придерживаться плотности населения не менее 15 000 человек на кв. км (UN-HABITAT, 2014). Так, в случае совершенствования методологии реновации в сторону применения ГИС, возникает резонный вопрос о способе обработки и пространственной репрезентации данных, представляющих плотность населения как влияющий фактор, недостаточно учтенный в лучших практиках (Omidipoor et al., 2019; Kah & Alain, 2021; Morckel, 2017; Wang & Yang, 2022; Foroughi & Rasol, 2016).

В связи с вышесказанным, целью данной работы является выработка нового способа к анализу, прогнозированию и пространственной репрезентации данных о плотности населения, пригодной в качестве влияющего фактора в планировании реновации территории в ГИС.

Материалы и методы исследования. На рис. 1 представлена общая концепция предлагаемого подхода.

Способ, представленный на рис. 1, предполагает использование статистических данных по численности населения, вводу жилья в эксплуатацию и актуальной карты зданий в качестве исходных данных для поэтапного моделирования, пространственного анализа и репрезентации в ГИС с целью получения растровой карты плотности населения на прогнозируемые периоды.

Тестирование предлагаемого способа производилось на примере города Астана (Казахстан) с данными о численности населения и вводе жилья в эксплуатацию на 2003-2023 гг., полученными из базы данных портала Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан (QazStat, 2024). Данный выбор обуславливается наличием действующего на данный момент в Астане конкретного плана реализации программы реновации на 2024-2028 гг.

(Смаилов, 2023), а период 2003-2023 гг. обусловлен наличием в (QazStat, 2024) статистических данных одновременно и по численности населения, и по вводимому в эксплуатацию жилью именно в этом промежутке (рис. 2). Векторная карта города была получена с бесплатного интернет-ресурса OpenStreetMap (OpenStreetMap, 2024).



Рисунок 1. Способ пространственного анализа плотности населения в ГИС

Примечание – составлено авторами

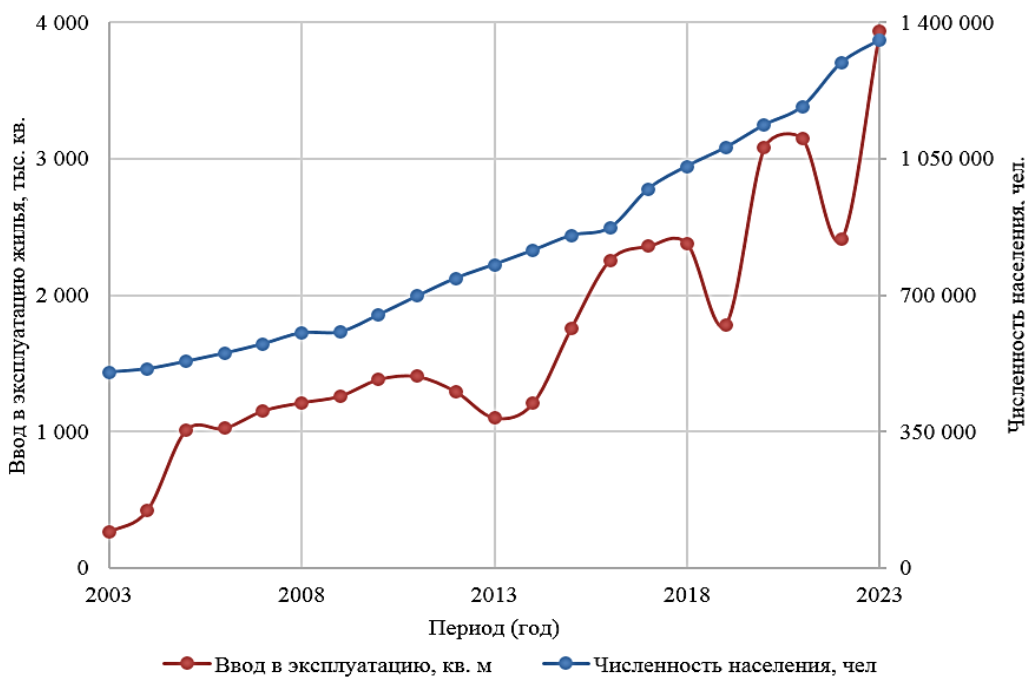


Рисунок 2. Исходные статистические данные (QazStat, 2024)

Примечание – составлено авторами на основе статистических данных (QazStat, 2024)

Прогноз численности населения и ввода жилья в эксплуатацию выполнялся на период с 2024 по 2029 гг. Конечный год прогноза был определен исходя из сроков реализации Концепции развития жилищно-коммунальной инфраструктуры (Смаилов, 2022). Для

каждого из графиков на рис. 2 были построены линии тренда, которые определялись по максимальному значению величины достоверности аппроксимации R^2 . Прогнозируемые данные обозначили следующим образом:

- N_n – прогнозируемая численность населения на требуемый период;
- S_n – прогнозируемая площадь вводимого жилья на требуемый период;
- n – требуемый период (год) прогнозирования.

Моделирование, пространственный анализ и репрезентация данных выполнялись в программном обеспечении ArcGIS. Для простоты было выделено 8 операций.

Первая операция (Operation 1) включает в себя выборку жилых зданий из общего объема всех зданий. Ограничения задавались для исключения из моделирования нежилых зданий в связи с тем, что информация о точном расположении жилых зданий отсутствует в открытых источниках. Также в модели для пространственного анализа использовалось значение площади полигона жилого здания (S_m), так как информации об общей площади каждого жилого дома не имеется в общем доступе. Для это были заданы условия по площади требуемых полигонов жилых домов (S_m) на карте:

$$50 \leq S_m \leq 10000, \quad (1)$$

где: S_m – площадь полигона.

Таким образом, в рамках данной работы допускается, что площадь полигона жилого здания (S_m) не меньше 50 кв.м и не больше 10 тыс. кв.м.

После того как были заданы ограничения для полигонов жилых зданий, начинается вторая операция (Operation 2). В таблице атрибутов создается поле «Площадь полигона S_m » и для каждого выбранного полигона рассчитывается площадь с помощью инструмента Calculate Geometry. Далее выполняется расчет суммы всех полигонов ΣS_m при помощи инструмента Dissolve (Operation 3).

Четвертая операция (Operation 4) включает в себя конвертацию полигонов в точки через инструмент Feature to point, а также создание полей в таблице атрибутов и расчет значений в этих полях для следующих данных:

- весовой коэффициент каждого выбранного полигона (γ_m);
- прогнозируемый прирост площади полигона на требуемый период в кв.м (S_{mnf});
- прогнозируемая площадь полигона на требуемый период в кв.м (S_{mf}).

Весовой коэффициент (γ_m) рассчитывался как отношение площади полигона к сумме площадей всех полигонов согласно формуле (2):

$$\gamma_m = \frac{S_m}{\Sigma S_m}. \quad (2)$$

Данный коэффициент позволит определить прирост площади (S_{mnf}) каждого полигона с помощью спрогнозированной общей площади ввода в эксплуатацию для каждого года (S_n) по формуле (3):

$$S_{mnf} = \gamma_m \times S_n. \quad (3)$$

Прирост площади (S_{mnf}) показывает, насколько должна увеличиться площадь существующего полигона жилого дома на основании прогноза ввода в эксплуатацию. После того как определен прирост (S_{mnf}), можно определять прогнозируемую площадь каждого полигона (S_{mf}) по формуле (4):

$$S_{mf} = S_m + S_{mnf}. \quad (4)$$

Прогнозируемая площадь полигона жилого дома (S_{mf}) говорит о том, какой будет площадь полигона (S_m) с учетом прогноза ввода в эксплуатацию (S_n) на требуемый период.

В рамках пятой операции (Operation 5) создается поле и выполняется расчет значений в таблице атрибутов для весового коэффициента прогнозируемой площади полигона на требуемый период (γ_{mf}). Данный коэффициент определяется как отношение прогнозируемой площади одного полигона к общей прогнозируемой площади всех полигонов:

$$\gamma_{mf} = \frac{S_{mf}}{\sum S_{mf}}. \quad (5)$$

После получения значений весового коэффициента (γ_{mf}) выполняется шестая операция (Operation 6): создается последнее поле в таблице атрибутов для прогнозируемой приближенной плотности населения (N_{mnf}). Значение N_{mnf} рассчитывается по формуле (6):

$$N_{mnf} = \gamma_{mf} \times N_n. \quad (6)$$

Шестая операция завершает этап моделирования и пространственного анализа. Далее выполняется репрезентация пространственных данных (Operation 7) путем создания растровой карты плотности населения. При создании карты используются инструменты: Random points – для создания точек в каждом объекте; Kernel density – для расчета плотности населения методом интерполяции.

Завершающей операцией (Operation 8) является импорт всех растровых и векторных данных в единую базу геоданных.

Результаты и их обсуждение. График прогноза численности населения показан на рис. 3. Для прогноза численности населения была выбрана полиномиальная линия тренда со значением величины достоверности аппроксимации $R^2=0,9976$.

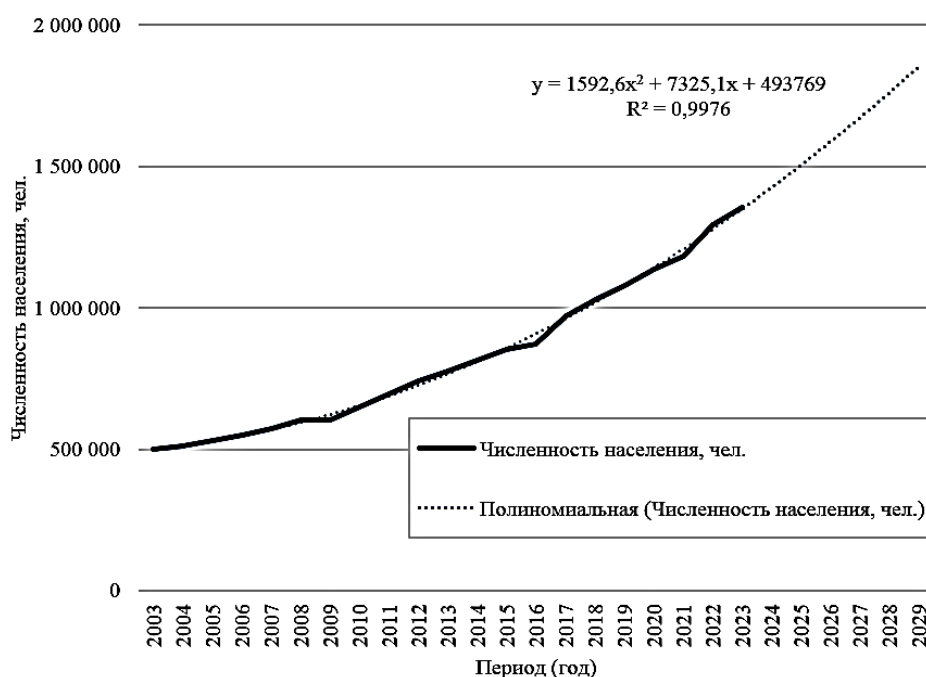


Рисунок 3. Прогноз численности населения г. Астана на 2024-2029 гг.

Примечание – составлено авторами

Уравнение линии тренда имеет следующий вид:

$$y = 1592,6x^2 + 7325,1x + 493769, \tag{7}$$

где: x – период прогноза; y – N_n , прогнозируемая численность населения на период.

График прогноза ввода в эксплуатацию жилья показан на рис. 4.

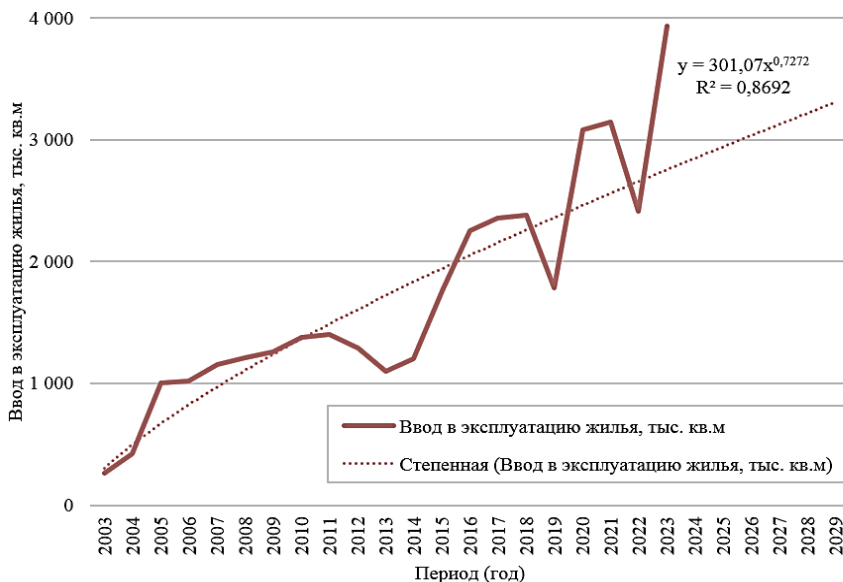


Рисунок 4. Прогноз объема ввода в эксплуатацию жилья в г. Астана на 2024-2029 гг.

Примечание – составлено авторами

Для прогноза объема ввода в эксплуатацию жилья была выбрана степенная линия тренда со значением величины достоверности аппроксимации $R^2=0,8692$. Уравнение линии тренда имеет следующий вид:

$$y = 301,07x^{0,7272}, \tag{8}$$

где: x – период прогноза; y – прогнозируемый объем ввода в эксплуатацию жилья на период.

Прогнозируемые данные численности населения (N_n) и ввода в эксплуатацию жилья (S_n), используемые для моделирования и пространственного анализа в ГИС, собраны в табл. 1.

Таблица 1. Результаты прогнозирования численности населения и объема ввода в эксплуатацию на 2024-2029 гг.

Год	2024	2025	2026	2027	2028	2029
Численность населения N_n , чел.	1 425 740	1 504 732	1 586 909	1 672 272	1 760 819	1 852 552
Ввод в эксплуатацию жилья S_n , тыс. кв.м	2 850	2 944	3 036	3 128	3 218	3 308

Примечание – составлено авторами

По итогам моделирования и пространственного анализа была сформирована таблица с атрибутами (табл. 2), которая легла в основу модели прогнозирования плотности населения (рис. 5).

Таблица 2. Атрибуты для моделирования прогноза плотности населения

Площадь полигона S_m, M^2	Сумма площадей полигонов $\Sigma S_m, M^2$	Весовой коэффициент полигона γ_m	Прогноз. прирост площади к полигону $S_{mnf}, KB.M$	Прогноз. площадь полигона на период $S_{mf}, KB.M$	Сумма прогноз. площадей полигонов на период $\Sigma S_{mf}, KB.M$	Весовой коэф. полигона по прогнозу. площади γ_{mf}	Прогноз. приближ. плотности населения $N_{mnf}, ЧЕЛ$
<i>Примечание – составлено авторами</i>							

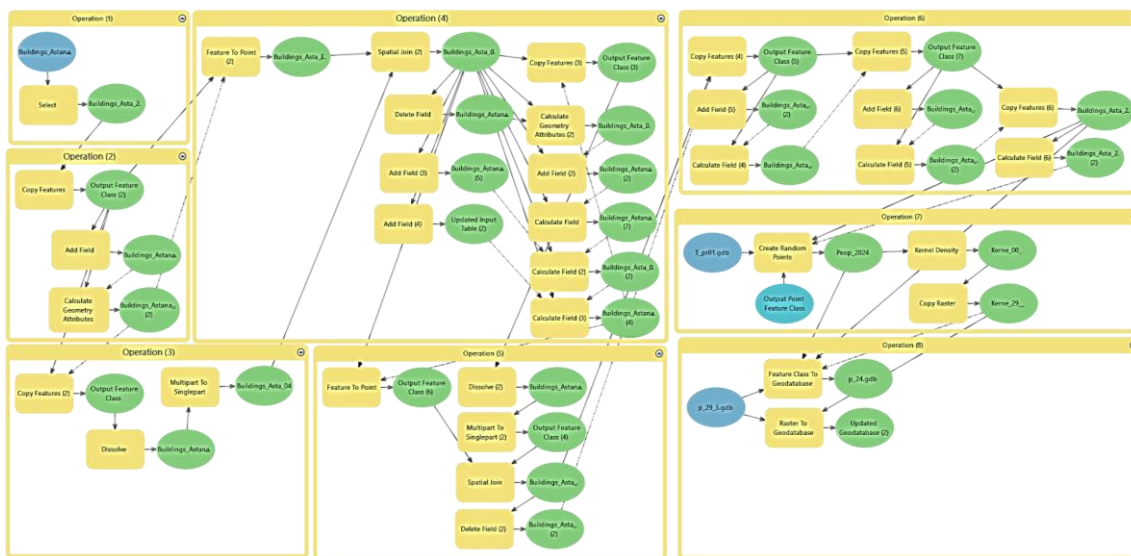


Рисунок 5. Модель прогнозирования плотности населения

Примечание – составлено авторами

Модель включает 8 операций:

1. Выборка жилых зданий из общего объема зданий.
2. Создание поля в таблице атрибутов и расчет значения площади полигонов жилых зданий (S_m).
3. Создание поля в таблице атрибутов и расчет значения суммы площадей всех полигонов жилых зданий (ΣS_m).
4. Создание полей в таблице атрибутов и расчет значений:
 - 4.1 весового коэффициента полигонов жилых зданий, взятого по площади полигона (γ_m);
 - 4.2 прогнозируемого прироста площади полигона на требуемый период (S_{mnf});
 - 4.3 прогнозируемой площади полигона на требуемый период (S_{mf}).
5. Создание полей в таблице атрибутов и расчет значений:
 - 5.1 суммы прогнозируемых площадей полигонов на требуемый период (ΣS_{mf});
 - 5.2 весового коэффициента полигонов жилых зданий, взятого по прогнозируемой площади полигона на требуемый период (γ_{mf}).
6. Создание поля в таблице атрибутов и расчет значения прогнозируемой приближенной плотности населения на требуемый период (N_{mnf}).
7. Создание растровой карты распределения прогнозируемой приближенной плотности населения на требуемый период.
8. Импорт векторных и растровых данных в единую базу геоданных.

На рис. 6 показаны результаты репрезентации пространственных данных прогнозируемой плотности населения в г. Астана на период 2024-2029 гг.

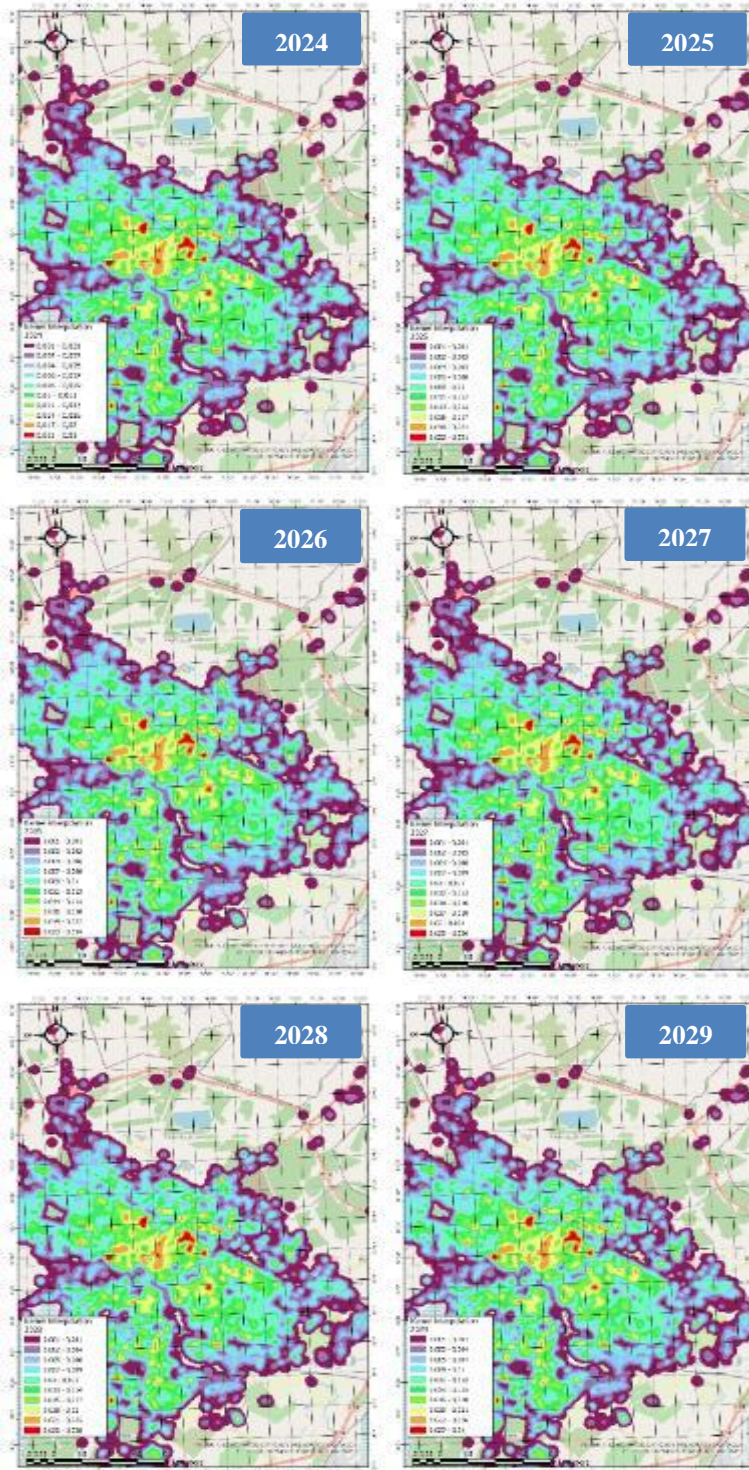


Рисунок 6. Карты прогнозируемой плотности населения на 2024-2029 гг.

Примечание – составлено авторами

На смоделированных картах плотности населения градация плотности идет от красного (самая высокая плотность) к фиолетовому (самая низкая плотность). Легенда отображает значения количества человек на 1 пиксель, где за пиксель принят участок 50x50 метров. Таким образом, минимальная приближенная плотность $N_{\text{minf}} = 0,001$ означает, что на площадь в 250 кв. м приходится 2,5 человека, а при максимальной приближенной плотности $N_{\text{maxf}} = 0,03$ – 75 человек.

Как видно, на окраинах города самая низкая плотность, а самая высокая плотность наблюдается в районе Байконур, также имеются небольшие участки с повышенной плотностью в районах Алматы и Нура. Стоит отметить, что локализация участков с повышенной плотностью не изменяется в течение рассматриваемого периода. На первый взгляд на картах динамика изменения плотности не ярко выражена. Однако, если рассматривать отдельные районы, то можно заметить некоторые изменения. На рис. 7 показано сравнение построенных карт приближенной плотности за 2024 и за 2029 годы на участке с максимальными значениями.

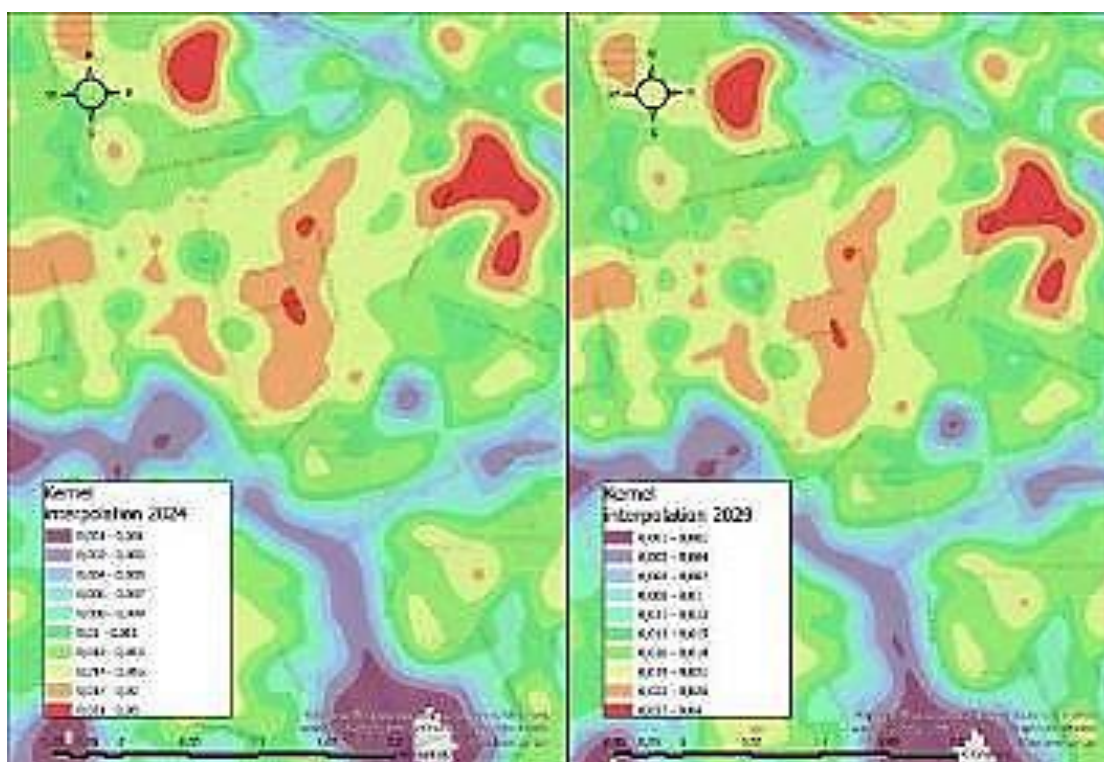


Рисунок 7. Сравнение прогнозируемой приближенной плотности населения на 2024 (слева) и 2029 (справа) годы

Примечание – составлено авторами

На картах наблюдается некоторое снижение плотности по отдельным зонам: красные, оранжевые и светло-зеленые участки уменьшаются, а зеленые и фиолетовые участки увеличиваются, но в целом локализация повышенной плотности сохраняется.

Заключение. В рамках данного исследования было выявлено, что общедоступные данные Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан позволяют спрогнозировать такие метрики, как численность населения и площадь ввода в эксплуатацию жилья, которые могут лечь

в основу модели прогнозирования плотности населения. Полученная модель прогнозирования показала, что в период 2024-2026 гг. районом с самой высокой плотностью является Байконур. Эти данные необходимо учесть при дальнейшем планировании реновации аварийного и ветхого жилья как приоритетные локации. Недостатком полученной модели можно отметить, что она основывается на данные о занимаемой площади на карте полигонами жилых зданий. Это связано с тем, что в общем доступе отсутствует информация об общей площади отдельно для каждого конкретного жилого дома. Таким образом, предлагаемая модель может быть доработана путем добавления в таблицу атрибутов данных об этажности и количестве блок-секций по каждому жилому зданию либо данных об общей площади здания на каждом полигоне. Кроме этого, существенно бы улучшило модель наличие данных о фактическом количестве проживающих людей в каждом здании.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Выражается благодарность ТОО «Solid Research Group» за предоставление возможности пользования лицензионным ПО ArcGIS.

Список литературы

- Foroughi, S., & Rasol, M. A. (2016). Housing renovation priority in the fabric texture of the city using the analytic hierarchy model (AHP) and geographic information system (GIS): A case study of Zanjan City, Iran. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 19(2), 323–332. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.05.001>
- Kah, E., & Alain, T. S. (2021). GIS Application and Architectural Design for the Assessment of Urban Infrastructural Renovation: Case of the Nsam Market in the Yaounde III Municipality, Cameroon. *Journal of Geographic Information System*, 13(04), 369–394. <https://doi.org/10.4236/jgis.2021.134021>
- KAZAKHSTAN TODAY. (2024). Вместо зеленых палисадников - многоэтажные общежития: жители одного из районов Алматы выступили против его реновации. https://www.kt.kz/rus/society/vmesto_zelenyh_palisadnikov_-_mnogoetazhnye_obschezhiya_1377966161.html
- Morckel, V. C. (2017). Using suitability analysis to prioritize demolitions in a legacy city. *Urban Geography*, 38(1), 90–111. <https://doi.org/10.1080/02723638.2016.1147756>
- Omidipour, M., Jelokhani-Niaraki, M., Moeinmehr, A., Sadeghi-Niaraki, A., & Choi, S.-M. (2019). A GIS-based decision support system for facilitating participatory urban renewal process. *Land Use Policy*, 88, 104150. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.104150>
- OpenStreetMap. (2024). <https://www.openstreetmap.org/#map=11/51.1402/71.4482>
- QazStat. (2024). Summary of the socio-economic development of the region. <https://stat.gov.kz/en/region/astana/>
- UN-HABITAT. (2014). A New Strategy of Sustainable Neighbourhood Planning: Five principles - Urban Planning. <https://unhabitat.org/five-principles-of-neighbourhood-design>
- Wang, M., & Yang, J. (2022). Sustainable Renewal of Historical Urban Areas: A Demand–Potential–Constraint Model for Identifying the Renewal Type of Residential Buildings. *Buildings*, 12(8), 1210. <https://doi.org/10.3390/buildings12081210>
- Zhussupov, T. V., Aniskin, A., Utepov, Ye. B., & Bazarbayev, D. O. (2022). Defining the criteria for the dilapidated state of buildings. *Bulletin of Kazakh Leading Academy of Architecture and Construction*, 86(4), 172–180. <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2022.4-17>
- Адамбусинова, З., Садуакасова, А., & Малайсарова, А. (2020). Проект «Реновация». Социологический компонент. <https://urbanforum.kz/renovation-social>
- Ахметов, Е. (2024, December 10). Программа реновации в Костаная: сносом старых домов и рынка недовольна часть горожан. https://baigenews.kz/programma-renovatsii-v-kostanae-snosom-staryh-domov-i-rynka-nedovolna-chast-gorozhan_300003316/
- Ахметов, К. (2022). О принятии Программы реновации жилищного фонда города Костаная на 2022-2025 годы. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G22NA00143A>
- Файса, Б. (2023). Программа реновации жилищного фонда города Кокшетау до 2026 года. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G23BA04591A>

- Фролова, А. (2023, February 8). Жители Шымкента выступают против реновации и сноса своих домов. <https://orda.kz/zhiteli-shymkenta-vystupayut-protiv-renovaczii-i-snosa-svoih-domov/>
- Захарова, М. (2023, October 10). Астана устарела, вместо нее появится абсолютно новый город. <https://365info.kz/2023/10/astana-ustarela-vmesto-nee-poyavitsya-absolyutno-novyy-gorod>
- Нурсагатов, Н. (2023). Программа реновации жилищного фонда города Семей на 2023-2025 годы. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G23FA00529A>
- Омар, Ж. (2024). Программа реновации жилищного фонда города Усть-Каменогорска на 2024-2029 годы. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G24VA01638A>
- Темирханов, Е. (2022). Программа реновации жилищного фонда в городе Сарани и поселке Актас. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G22KG02103A>
- Сагинтаев, Б. (2021). Программа реновации жилищного фонда в городе Алматы на 2021-2025 годы. <https://gkhsp.kz/wordpress-my/wp-content/uploads/2021/04/programma-renovaczii-zhilishhnogo-fonda-v-gorode-almaty-na-2021-2025-gody.pdf>
- Сарсембаева, Б. (2023). Лишили права голоса: алматинцы недовольны новыми нормами программы реновации жилья. <https://vecher.kz/ru/article/lishili-prava-golosa-almatinsy-nedovolny-novymi-normami-programmyrenovasiijilia.html>
- Смаилов, А. (2022). Концепция развития жилищно-коммунальной инфраструктуры на 2023 – 2029 годы. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2200000736>
- Смаилов, А. (2023). Программа реновации аварийных и модернизации жилых домов города Астаны. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300001225>
- Сыздықбеков, Ғ. (2024). Программа реновации жилищного фонда в городе Шымкент. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G24E005221A>
- Таурбеков, О. (2022). Программа реновации жилищного фонда в городе Темиртау и поселке Актау. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G22KC00677A>
- Телгараев, Т. (2022). Программы реновации жилищного фонда Толембийского района. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G22UM00609A>
- Тналиев, У. (2024). Программа реновации жилищного фонда города Актау на 2023-2029 годы. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/G24MA11078A>
- Турар, А. (2024, April 8). Жители Кокшетау показали жизнь в трущобах. https://baigenews.kz/zhiteli-kokshetau-pokazali-zhizn-v-truschobah-akim-poobeschal-ih-pereselit_173760/

Information about authors

Zhussupov Timur Victorovich – Master of Technical Sciences, PhD Student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: timurvictorovich@gmail.com, ORCID:0000-0002-7840-3550, +7 771 020 3216

Uteпов Yelbek Bakhitovich – PhD, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, E-mail: uteпов-elbek@mail.ru, ORCID:0000-0001-6723-175X, +7 700 210 1733

Aniskin Aleksej – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, University North, Varaždin, Croatia, E-mail: aaniskin@unin.hr, ORCID:0000-0002-9941-1947, +385 92 304 9406

Aldungarova Aliya Kairatovna – PhD, Associate Professor, Agrotechnical Institute named after. S. Sadvakasov, Kokshetau University named after Sh. Ualikhanov, Kokshetau, Kazakhstan, E-mail: liya_1479@mail.ru, ORCID:0000-0002-9248-7180, +7 701 570 4381

Karaulov Sabit Altynbekovich – Junior Researcher, «Solid Research Group» LLP, Astana Kazakhstan, E-mail: karaulovsabit1997@gmail.com, ORCID:0009-0006-0471-2808, +7 700 383 0734

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС
АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО
ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_295
IRSTI 67.03.03

A. Kassenova¹, S. Akhazhanov², A.Zh. Nurgoziyeva²

¹Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

E-mail: kassenova.aigerim@mail.ru

²Karaganda Buketov University, Karaganda, Kazakhstan

E-mail: stjg@mail.ru

E-mail: aizhazhanabai@gmail.com*

EXAMINATION OF A SOLID STAMP ON AN ELASTIC FOUNDATION

СЕРПІМДІ НЕГІЗДЕГІ ҚАТТЫ ШТАМПТЫ ЗЕРТТЕУ

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОГО ШТАМПА НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Abstract. The paper considers obtaining results of calculating the normal stress, vertical displacement, deflection and reactive pressure for a solid stamp on an elastic foundation. The values of these calculations are used in solving problems of elasticity theory, but in practice it is difficult to obtain the results of these problems. According to the Sadovsky method, the value of the reactive pressure on an elastic half-plane foundation under a solid stamp tends to infinity. Calculations performed for a solid stamp on an elastic base are poorly studied, but are widely used in modern construction, and improvement of its calculation methods is mandatory. Therefore, the development of new, simple analytical and numerical improved methods for solving these problems is relevant. The paper defines the values of the deflection function for soil foundation with different modulus of elasticity. As a result, the bearing property of the foundation decreases, the elastic soil foundation tends to perceive heavy loads, affects its shrinkage and displacement. In addition, a change in the values of normal stress and vertical displacement was detected due to the transformation of the l/h ratio lying outside the stamp. The maximum values of normal stress and vertical displacement in the specified intervals and the reactive pressure of the stamp under the action of a uniformly distributed load are calculated. The results of these calculations play an important role in the field of construction mechanics, that is, simplify the process of analysis and design of structures. The development of this improved equation opens up new opportunities for further research and implementation into engineering practice, and is also used to calculate a beam on an elastic foundation.

Keywords: elastic foundation, stamp, normal stress, vertical displacement, deflection, reactive pressure.

Аңдатпа. Мақалада серпімді негіздегі қатты штамп үшін нормалдық кернеу, тік жылжу, майысу және реактивтік қысым нәтижелерін алу қарастырылған. Бұл есептеулердің мәндері серпімділік теориясының есептерін шешуде қолданылады, бірақ іс жүзінде алынған нәтижелер өте күрделі болып келеді. Садовский әдісі бойынша қатты штамп астындағы серпімді жартылай негізде пайда болатын реактивтік қысым штамптың периметрі бойынша шексіздікке ұмтылады. Серпімді негіздегі қатты штамп үшін орындалатын байланыс есептеулері аз зерттелген, бірақ қазіргі заманғы құрылыста кеңінен қолданылады және оны есептеу әдістерін жетілдіру міндетті. Сондықтан осы мәселелерді шешудің жаңа, қарапайым аналитикалық және сандық жетілдірілген әдістерін әзірлеу өзекті мәселе болып табылады. Мақалада әртүрлі серпімділік модулі бар топырақты негіздер үшін, майысу функциясының мәндері анықталды. Нәтижесінде негіздің көтергіштік қасиеті төмендегенін көрсетеді, серпімді топырақ негізі үлкен жүктемелерді қабылдау қасиеті, оның шөгуді мен жылжуына әсерін тигізеді. Сонымен қатар, штамптан тыс жатқан l/h қатынасын өзгерту арқылы нормальді кернеу мен тік жылжу мәндерінің өзгерісі анықталды. Нормальді кернеу мен тік жылжудың берілген аралықтардағы ең үлкен мәндері және жинақталған күш әсер еткенде штамптың реактивтік қысымы есептелінді. Мақалада алынған нәтижелер құрылыс механика саласында маңызды болып табылады, яғни құрылымдарды талдау және жобалау процесін жеңілдетеді. Бұл жетілдірілген тәсілді әзірлеу

кейінгі зерттеулер мен инженерлік тәжірибеге енгізудің жаңа мүмкіндіктерін ашады және оны серпімді негіздегі арқалықты есептеу саласында қолданылады.

Түйін сөздер: серпімді негіз, штамп, нормалдық кернеу, тік жылжу, майысу, реактивтік қысым.

Аннотация. В статье рассматривается получение результатов расчета нормального напряжения, вертикального перемещения, изгиба и реактивного давления для жесткого штампа на упругом основании. Значения этих расчетов используются при решении задач теории упругости, однако на практике получения результатов этих задач является сложным. По методу Садовского значение реактивного давления на упругом полуплоском основании под жестким штампом стремится к бесконечности. Расчеты, выполняемые для жесткого штампа на упругом основании малоизучены, но широко используются в современном строительстве, и усовершенствование методов его расчета является обязательным. Поэтому разработка новых, простых аналитических и численных усовершенствованных методов решения этих задач является актуальным. В статье определены значения функции изгиба для грунтовых оснований с различным модулем упругости. В результате несущее свойство основания снижается, упругое грунтовое основание имеет свойство воспринимать большие нагрузки, влияет на его усадку и перемещение. Кроме того, обнаружено изменение значений нормального напряжения и вертикального перемещения за счет преобразования отношения l/h , лежащего вне штампа. Рассчитаны максимальные значения нормального напряжения и вертикального перемещения в заданных интервалах и реактивное давление штампа при действии равномерно распределенной нагрузки. Результаты указанных расчетов играют большую роль в области строительной механики, то есть упрощают процесс анализа и проектирования конструкций. Разработка данного усовершенствованного уравнения открывает новые возможности для последующих исследований и внедрения в инженерную практику, также используется для расчета балки на упругом основании.

Ключевые слова: упругое основание, штамп, нормальное напряжение, вертикальное перемещение, изгиб, реактивное давление.

Introduction. The theory of calculating beams on an elastic foundation is important in construction practice. The problems associated with the study of structures lying on an elastic foundation represent one of the most urgent, complex interesting tasks of construction mechanics. Recently, attention to these tasks has been increasing. On the one hand, this is due to the urgent needs of engineering practice, and on the other hand, to the development and improvement of calculation methods. When calculating a beam on an elastic foundation, first we establish a calculation model of the l/h of the beam and consider the conditions of its contact with the foundation, and then we calculate and compare the calculation options (Khryanina, 2016).

Two solutions of the theory of elasticity have become important for the calculation of beams on an elastic foundation. Boussinesq's solution for a solid elliptical stamp on an elastic half-space in its special case – for a solid centrally loaded round stamp - has found wide application for the calculation of round solid plates. The second solution – for a solid strip in the conditions of a flat problem – belongs to Sadovsky. The obtained formulas and diagrams of reactive pressures are almost identical (Tsvei, 2014). L.G. Petrosyan's paper (Yaretskaya, 2018) provides a numerical solution to the contact problem for a solid stamp with a flat sole pressed without friction into an elastic foundation described by a generalized model. The contact problem is formulated in the form of paired integral equations, and the proposed model allows us to obtain pressure plots for an elastic half-space.

Spatial contact problems with an unknown contact area are studied for an elastic layer of finite thickness, into one face of which two identical elliptical solid stamps are symmetrically pressed. The problems are reduced to an integral equation regarding the contact pressure. As a result, the contact pressure is decomposed in a series according to the degrees of a small parameter characterizing the relative thickness of the elastic layer (Balabušić, Folić & Ćorić, 2019).

When solving problems of elasticity theory for a half-space, integrations of cumulative differential equations are used, but in practice, this method turns out to be very difficult. Therefore, a semi-reversible method was proposed to obtain the final solution, that is the reaction of an elastic half-space under a centrally loaded rectangular stamp. The reaction of the elastic half-space and the reactive pressure along the perimeter of the stamp takes the value to infinity (Bosakov, 2019).

The effect of a uniformly distributed load when calculated according to the theory of elasticity, the reactive pressures are uniform only for an infinitely flexible band ($t \rightarrow \infty$). As the flexibility index decreases, the unevenness of the plot increases with increasing pressure towards the edges. At $t=0$, so for a solid strip, the reactive pressures are distributed according to Sadovsky's formula, and integrating this equation at the free edges of the strip, we obtained the equations for a solid stamp (Ledenov, Monastyrsev et al., 2016).

In the field of construction mechanics of contact interactions, non-stationary contact problems are the least studied. These tasks are extremely important for various sectors of the national economy, such as geophysics, seismology, acoustics, vibro-seismic exploration, foundation engineering, military industry, etc. (Li, Arutiunian, Kuznetsova & Fedotenkov, 2020). To date, there is only a limited range of works devoted to the study of the processes of non-stationary contact interaction for a solid stamp and an elastic half-space. In one of the papers, a formulation is given and a method is developed for solving new planar non-stationary contact problems for absolutely solid stamps and an elastic half-space containing a recessed cavity with a smooth boundary of arbitrary geometry. A resolving boundary integral equation is constructed using Green's functions for an elastic half-plane. In the work of the following authors (Arutyunyan, Kuznetsova & Fedotenkov, 2020), three solutions to the contact problem are considered: free sliding, solid coupling and related contact. The method of solving the problem is constructed using complex boundary integral equations using the dynamic mutual work theorem. The method and solution algorithm developed by the authors allow it possible to study the processes of non-stationary contact interaction of solids with an elastic half-space.

The calculation of the elastic precipitation of solid rectangular foundations is one of the most important tasks in classical mechanics for solving the precipitation of shallow foundations. To calculate them, an analysis of the method of calculating the elastic precipitation of a solid foundation was proposed. In the proposed pressure problems, when using a reference pressure, the calculated value turns out to be unfavorable, which explains the complexity of the analytical evaluation of the method. The methods of solving the problem proposed by the authors are based on the concept of an equivalent shape, which replaces any solid rectangular foundation with a foundation on the concept of an equivalent shape. The analysis showed that an equivalent ellipse gives satisfactory results only if the condition of an even area, that is, an even perimeter length, is fulfilled (Lysandros, Elias, 2020).

Contact problems for an elastic strip on a solid foundation have been studied a lot less, but are widely used in modern construction and improving its calculation methods is a necessary engineering task. To construct a matrix of vertical displacements of the points of the end of the half-strip from the concentrated force, variational-difference methods are used. Based on these movements, without taking into account friction in the contact zone, the tasks for a stamp of different sizes pressed against the end of the strip are solved. The results of the distribution of contact stresses and deflection moments, the vertical displacements almost coincide with similar calculations for an elastic half-plane (Bosakov, 2023).

The above works are distinguished by the complexity of mathematical calculations to find a solution. The solution of the contact problem for a stamp located on an elastic half-space is given below in a simpler way. In the following work (Akhazhanov, Omarbekova et al., 2020), a new method for obtaining an analytical solution to the problem of deflection a beam on an

$$\sigma_3 = \frac{k^4 \beta}{6\gamma} \alpha(z_0) \left(\frac{L}{h}\right)^3 \left(\frac{l}{h}\right) \cdot q_0 \quad (2)$$

The vertical displacement of the point of application of force on the half-plane (Akhazhanov, 2020):

$$\begin{aligned} f(z_0) &= \left[1 + \frac{k(1+\nu)}{2} z_0\right] \cdot e^{-kz_0} \\ U_3(x_1, z_0) &= f(z_0) \frac{2\beta l q_0}{E\gamma} \left(\frac{L}{h}\right)^3 \end{aligned} \quad (3)$$

According to (1), the reactive pressure of the half-plane acting on the stamp is determined as follows ($\beta = 1$):

$$\begin{aligned} r &= \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{12}} q_0 \\ \gamma_{11} &= \pi(1 - \nu^2) \left(\frac{L}{h}\right)^3, \quad \gamma_{12} = 1 + \gamma_{11} \end{aligned} \quad (4)$$

Resultant force of external and reactive pressure according to Flaman:

$$2R = \beta \cdot \ell(q_0 - r) \quad (5)$$

The reactive pressure r_0 on the edge of the stamp is determined using the formula (5):

$$\begin{aligned} R &= \beta_1 r_0 l \\ \beta_1 r_0 l &= \frac{q_0 l}{2} \left(1 - \frac{\pi(1-\nu^2) \left(\frac{L}{h}\right)^3}{1 + \pi(1-\nu^2) \left(\frac{L}{h}\right)^3}\right) \\ \beta_1 r_0 &= \frac{q_0}{2\gamma_{12}} \\ r_0 &= \frac{q_0}{2\gamma_{12}\beta_1} \end{aligned} \quad (6)$$

The stamp draft at ($\beta = 1$) is determined by (1):

$$\begin{aligned} W_* &= \frac{\gamma_{23}}{\gamma_{22}} \\ \gamma_{12} &= 1 + \pi(1 - \nu^2) \left(\frac{L}{h}\right)^3 \\ \gamma_{23} &= \frac{2l}{E} q_0 \left(\frac{L}{h}\right)^3 \end{aligned} \quad (7)$$

Methods for calculating the stamp can be found in the works of Sadovsky and Dinnik. But $r_0 = \infty$ is a disadvantage of their solutions. In the literature (Galim, 1953), the reactive pressure of the stamp (Fig. 1) under the action of a concentrated force is defined as:

$$r(x_1) = \frac{2P}{\pi \cdot l \sqrt{1 - \frac{4x_1^2}{l^2}}} \quad (8)$$

where: P – is the concentrated force.

If $x_1 = \frac{l}{2}$ (edge of the stamp), then $r\left(\frac{l}{2}\right) = \infty$. This is a disadvantage of this calculation. In our solution, the reactive pressure at the edge of the stamp is r_0 . If in (7) $\beta_1=0$, then $r_0=\infty$. In this case, our solution will also have a disadvantage, but the value of the reactive pressure r_0 will depend on the length (L) of the half-plane, which is deformed outside the stamp, and its thickness (h) and according to (8), the reactive pressure depends only on the length of the stamp. The stamp is often used in life: in construction – the foundation; in blacksmithing – the sternum, etc. Therefore, the value of the reactive pressure (7) is high.

Results and discussions. Below, consider calculations performed using a solid stamp on an elastic two-parameter foundation. Using this method, it is possible to determine a draft, displacements of the ground and resistance of the soil foundation to external loads.

Determination of the mending on an elastic half-plane foundation under the stamp. Initial Data for calculation: stamp length $l=1\text{m}$, beam length parameter $\beta=0.01$, elastic foundation thickness $h=1\text{m}$, Poisson's ratio $\nu=0.3$, length of the foundation lying inside the stamp $L= 1\text{m}$, a uniformly distributed load $q_0=5\text{kN/m}$, the soil foundation is homogeneous. The calculation was based on the length of the foundation lying inside the stamp. With various changes in the elastic modulus of the foundation, the values of the deflection function were determined in how it affected the foundation. The mending of the elastic foundation is calculated for given different modules of elasticity of the soil foundation $E_1= 0.01\text{Pa}$, $E_2= 0.05\text{Pa}$, $E_3=0.1\text{Pa}$, $E_4=0.5\text{Pa}$ (Table 1).

Table 1. Deflection function values

x (m)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
W1(x)	9.722	9.722	9.722	9.722	9.722	9.722	9.722	9.722	9.722	9.722	9.722
W2(x)	1.944	1.944	1.944	1.944	1.944	1.944	1.944	1.944	1.944	1.944	1.944
W3(x)	0.972	0.972	0.972	0.972	0.972	0.972	0.972	0.972	0.972	0.972	0.972
W4(x)	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194	0.194

Note – compiled by the author

Where: $W_1(x)$, $W_2(x)$, $W_3(x)$, $W_4(x)$ – values of the deflection on an elastic half-plane foundation under the stamp. From the calculated values of the function, we see that as the modulus of elasticity of the soil foundation decreases, the value of the deflection function increases. As a result, the bearing property of the foundation shows a decrease, the elastic soil foundation tends to perceive heavy loads, affects its settlement and displacement. The values of the deflection calculations are displayed as a graph (Figure 2).

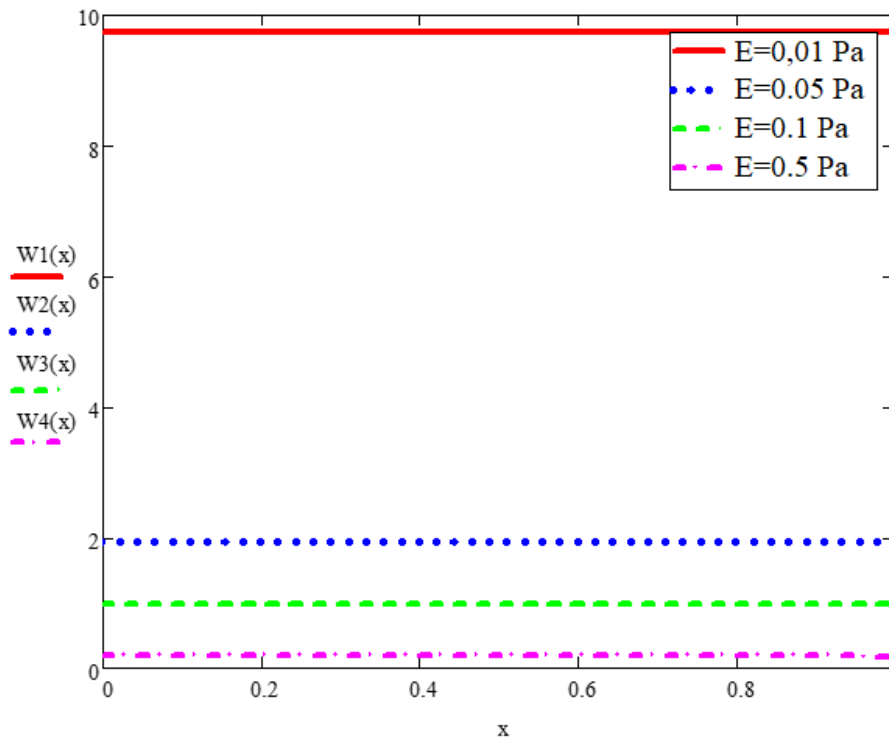


Figure 2. The deflection of the half-plane affecting on the stamp

Note – compiled by the author

Also in this paper, the change in the values of normal stress and vertical displacement is determined by changing the l/h ratio lying outside the stamp. Table 2 shows the maximum values of normal stress and vertical displacement at the specified intermediate parameters. As a result, the higher the length of the base lying outside the stamp, the lower the value of the normal stress, and the value of vertical displacement increases on the contrary. In addition, the values of normal stress and vertical displacement were determined by various parameters of the height of the elastic foundation. Carrying out these calculations makes it possible to conduct research on the entire length of the elastic foundation.

Table 2. Maximum values of normal stress and vertical displacement at specified intermediate parameters

L/h	$\sigma_3(z_0)$	$U_3(x_1, z_0)$
0,1	$-1,429 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$
0,5	-0,018	0,025
1	-0,139	0,194

Note – compiled by the author

The values of the results obtained from the calculation at different heights of the elastic foundation of vertical displacement were presented in the form of a diagram (Figure 3).

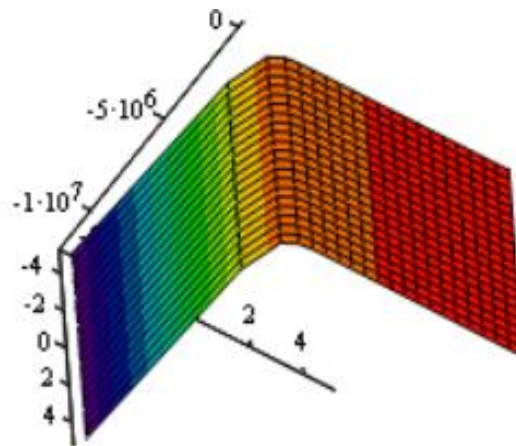


Figure 3. The vertical displacement of the elastic foundation

Note – compiled by the author

It is vital to consider the distribution of reactive pressure on the elastic half-plane, since the beam is calculated for uniformity from its solution. In this paper, the reactive pressure of the stamp is determined under the action of a concentrated load. In the calculation process, the beam length parameter was assumed to be $\beta_1=0.01$, because if $\beta_1=0$ is assumed, then the values of the reactive pressure will be infinite. The calculation of the reactive pressure of the elastic foundation and the parameters of the elastic body was determined by the formula (4). The reactive pressure at the edge of the stamp was determined according to the formula (6). All calculations were performed in the MathCAD program, the results are shown below.

$$\gamma_{11} := \pi(1 - \nu^2) \left(\frac{L}{h}\right)^3 = 2.857, \quad \gamma_{12} := 1 + \gamma_{11} = 3.857$$

$$r(x) := \frac{\gamma_{11}}{\gamma_{12}} \cdot q_0 = 3.7037901176958573132$$

$$r0(x) := \frac{q_0}{2\gamma_{12}\beta_1} = 64.810494115207134339$$

$$R1(x) := r0(x) + \left(\frac{107}{30}x^4 - \frac{107}{15}x^3 + \frac{107}{30}x\right)$$

$$R1(x) := \begin{cases} r0(x) & \text{if } x < 0.1 \\ r(x) & \text{otherwise} \end{cases} \quad R2(x) := \begin{cases} r0(x) & \text{if } x > 0.9 \\ r(x) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R(x) := R1(x) + R2(x)$$

The uniform forces of external and reactive pressure are shown in the form of a graph (Figure 4) with a high value of reactive pressure at the longitudinal edges of the elastic foundation. Also, as a result of the calculation, it was found that as the values of the x parameters in the stamp increase, the values of the reactive pressure on the elastic foundation approach the stamp.

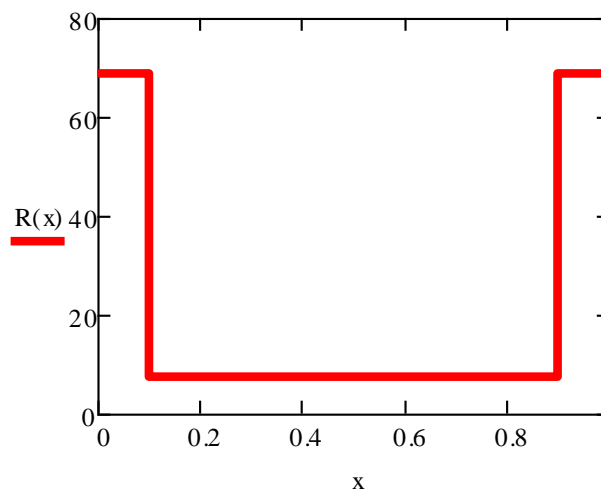


Figure 4. Reactive pressure of the elastic foundation

Note – compiled by the author

Conclusion. To summarize, simplified formulas for new calculations of a solid stamp on an elastic two-parameter foundation were considered. Using calculations, the values of ground sediment, vertical displacement, deflection and reactive pressure were determined. Using different elastic modulus in calculations, the values of the deflection function were compared, as a result of which the deflection value decreases as the elastic modulus increases. The values of vertical displacement and normal stress arising on the elastic foundation were changed taking into account the length lying outside the stamp. As a result, the value of the length lying outside the stamp decreases, the value of the vertical displacement decreases, and the value of the normal stress increases. In addition, this paper defines the values of the reactive pressure at the edge of the stamp and located horizontally, which occurs on an elastic foundation on which the stamp is installed. The values of the reactive pressure fluctuate depending on the distance of the regions on the elastic foundation. The system of solving equations is fully automated, and the calculation results are presented in the form of tables and plots, graphs.

Conflict of interest. The author(s) declare that there is no conflict of interest.

Acknowledgments. This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (AP22684709 – An improved

method for calculating deflection and free vibration of functionally graded beams resting on an elastic foundation).

'Notice of Use of Generative AI and AI-assisted technologies during the writing of the manuscript.' 'In preparing this paper, author team didn't use AI.

References

- Khryanina O.V. (2016). Sovmestnaya rabota gibkogo fundamenta s armirovannym osnovaniem: monografiya/ O.V. Khryanina. – Penza: PGUAS, -204s. ISBN 978-5-9282-1431-9
- Tsvei A.Yu. (2014). Balki i plity na uprugom osnovanii. Lektsii s primerami rascheta po spetsial'nomu kursu stroitel'noi mekhaniki: ucheb. posobie / A.Yu. Tsvei. – M.: MADI, – 96 s.
- Yaretskaya N.F. (2018). Contact Problem for the Rigid Ring Stamp and the Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *Int Appl Mech*, vol. 54, 539–543, <https://doi.org/10.1007/s10778-018-0906-y>.
- Balabušić M., Folić B., Čorić S. (2019). Bending the Foundation Beam on Elastic Base by Two Reaction Coefficient of Winkler's Subgrade. *Open Journal of Civil Engineering*, vol. 9, 123-134, DOI: 10.4236/ojce.2019.92009.
- Bosakov S. V. (2019). Reshenie kontaktnoi zadachi dlya uzla opiraniya balochnoi sharnirno opertoii plity. *Nauka i tekhnika*, T. 18, № 4, 274-283, <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-274-283>.
- Ledenov V.V., Monastyrev P.V., Kulikov G.M., Plotnikova S.V. (2016). Raschetnye modeli dlya proektirovaniya konstruksii i zdaniy : monografiya dlya nauchnykh i inzhenerno-tekhnicheskikh rabotnikov, aspirantov, magistrantov i studentov stroitel'nykh spetsial'nostei. Tambov: Izd-vo FGBOU VO «TGTU», – 296 s. – 400 ekz. ISBN 978-5-8265-1660-7
- Yulong Li., Arutiunian A., Kuznetsova E., Fedotenkov G. (2020). Method for solving plane unsteady contact problems for rigid stamp and elastic half-space with a cavity of arbitrary geometry and location. *Incas Bulletin*, vol. 12, 99-113; <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2020.12.S.9>.
- Arutyunyan A., Kuznetsova E., Fedotenkov G. (2020). Plane unsteady contact problem for a rigid stamp and an elastic half-space with a cavity. *Trudy MAI*, 113, 2-28, <https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-02>.
- Lysandros P., Elias G. (2020). Elastic Settlement Analysis of Rigid Rectangular Footings on Sands and Clays. *Geosciences*, vol. 10, no. 12, 491, <https://doi.org/10.3390/geosciences10120491>.
- Bosakov S.V. (2023). Contact Problem for the End of Elastic Half-Strip. *Science & Technique*, 22(2), 127-130, <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2023-22-2-127-130>.
- Akhazhanov S., Omarbekova N., Mergenbekova A., Zhunussova G., Abydkeshova D. (2020). Analytical solution of beams on elastic foundation. *International Journal of Geomate*, 19(73), 193–200, DOI: 10.21660/2020.73.51487.
- Akhazhanov S.B., Vatin N.I., Akhmediyev S., Akhazhanov T., Khabidolda O., Nurgoziyeva A. (2023). Beam on a two-parameter elastic foundation: Simplified finite element model. *Magazine of Civil Engineering*, 121(5), 12107, DOI: 10.34910/MCE.121.7.
- Akhazhanov S., Bostanov B., Kaliyev A., Akhazhanov T., Mergenbekova A. (2023). Simplified method of calculating a beam on a two-parameter elastic foundation. *International Journal of GEOMATE*, vol. 25, no. 111, 33–40, <https://doi.org/10.21660/2023.111.3898>.
- Kasimov A.T., Akhazhanov S.B., Kassenova A.N., Abdrakhmanova K.A. (2024). Zhartylai serpimdili negizdi shoryrlanfan kysh əserine zertteu. *Trudy universiteta*, no. 3, 189-196, DOI: 10.52209/1609-1825_2024_3_189.
- Akhazhanov S.B. (2020). Serpimdili negizdegi arkalykty esepteu ədisi : monografiya / S. B. Akhazhanov ; QR bilim zhəne fylym min-gi, Akad. E.A.Beketov atyndary Qararandy memlekettik un-ti. - Qararandy : QarMU baspasy, 166, ISBN 9789965-39-868-1.
- Galim L.A. Kontaktnye zadachi teorii uprugosti. – M.: Gostekhizdat, 1953. – 268 s.

Information about authors

Kassenova Aigerim – Master of Technical Sciences, PhD Student, Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: kassenova.aigerim@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8725-5860>

Akhazhanov Sungat – PhD, Associate professor, Karaganda Buketov University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: stjg@mail.ru, +7 702 357 6413, <https://orcid.org/0000-0002-0903-3517>

Nurgoziyeva Aizhan – Master of Mechanics, Senior Lecturer, Karaganda Buketov University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: aizhanzhanabai@gmail.com

СӘУЛЕТ
АРХИТЕКТУРА
ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_304
MPHTI 67.25.03

**А.М. Мулдағалиева¹, С.Э. Мамедов², А.Н. Баракбаев¹,
Т.Т. Мусабаев⁴, Ш.Ж. Суранкулов¹**

¹Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
г. Астана, Казахстан

*E-mail: muldagaliyeva.ainur@gmail.com**

E-mail: arslaninter@gmail.com

E-mail: surankulovsh@mail.ru

²Евразийский национальный университет, г. Астана, Казахстан

E-mail: sp-proekt@bk.ru

³РГП «Госградкадастр», г. Астана, Казахстан

E-mail: t.musabayev@nationalplan.kz

АРХИТЕКТУРНО-ГРАДОСТРОИТЕЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ РЕКРЕАЦИОННЫХ УЛИЦ НА ПРИМЕРЕ УЛИЦЫ АЛМАТЫ В ГОРОДЕ АСТАНА

АСТАНА ҚАЛАСЫНДАҒЫ АЛМАТЫ КӨШЕСІ ҮЛГІСІНДЕ РЕКРЕАЦИЯЛЫҚ КӨШЕЛЕРДІ ҚАЛЫПТАСТЫРУДЫҢ СӘУЛЕТ-ҚАЛА ҚҰРЫЛЫСЫ ӘДІСТЕРІ

ARCHITECTURAL AND URBAN PLANNING METHODS OF FORMATION OF RECREATIONAL STREETS ON THE EXAMPLE OF ALMATY STREET IN THE CITY OF ASTANA

Аннотация. В данной статье рассматриваются архитектурно-градостроительные методы формирования рекреационных улиц на примере улицы Алматы в городе Астане. Особое внимание уделяется созданию безопасных и удобных пешеходных зон, улучшению экологической ситуации и снижению транспортной зависимости. В статье проведен анализ существующего состояния улиц, выявлены основные проблемы и предложены практические рекомендации по улучшению уличной инфраструктуры и созданию комфортной городской среды для жителей и гостей города.

Ключевые слова: архитектура, градостроительство, рекреационные улицы, пешеходные зоны, экологическая ситуация, Астана.

Аңдатпа. Бұл мақалада Астана қаласындағы Алматы көшесінің мысалында рекреациялық көшелерді қалыптастырудың сәулет-қала құрылысы әдістері қарастырылады. Ерекше назар қауіпсіз және ыңғайлы жаяу жүргіншілер аймақтарын құруға, экологиялық жағдайды жақсартуға және көлік тәуелділігін төмендетуге аударылады. Мақалада көшелердің қазіргі жағдайы талданып, негізгі мәселелер анықталып, көше инфрақұрылымын жақсарту және қала тұрғындары мен қонақтары үшін қолайлы қалалық ортаны құру бойынша практикалық ұсыныстар берілді.

Түйін сөздер: сәулет, қала құрылысы, рекреациялық көшелер, жаяу жүргіншілер аймақтары, экологиялық жағдай, Астана.

Abstract. This article discusses the architectural and urban planning methods for the formation of recreational streets, using Almaty Street in the city of Astana as an example. Particular attention is paid to creating safe and comfortable pedestrian zones, improving environmental conditions, and reducing transport dependency. The article analyzes the current state of the streets, identifies key issues, and offers practical recommendations for improving street infrastructure and creating a comfortable urban environment for residents and visitors.

Keywords: architecture, urban planning, recreational streets, pedestrian zones, environmental conditions, Astana.

Введение. Формирование улиц, пригодных для пешеходов, играет важную роль в создании безопасной и приятной городской среды. Пешеходоориентированные улицы снижают риск дорожно-транспортных происшествий благодаря широким тротуарам, четко обозначенным пешеходным переходам и снижению скоростного режима, что обеспечивает безопасное передвижение (Choi et al., 2016).

Удобные пешеходные зоны создают комфортные условия для передвижения, предоставляя удобные тротуары, зоны отдыха и зеленые насаждения. Это способствует активному образу жизни и физической активности горожан, а также снижению загрязнения воздуха и транспортных выбросов, благоприятно влияя на экологию города (Magdy et al., 2022).

Развитие пешеходных зон также нацелено на формирование центров города и общественных пространств, которые становятся местами социального и культурного взаимодействия, что делает город более привлекательным для жителей, туристов и инвесторов.

Правильное формирование улиц включает создание зеленых зон и парков вдоль дорог, что улучшает качество воздуха и снижает тепловой эффект городского острова. Деревья и растения поглощают углекислый газ и выделяют кислород, делая городскую среду более здоровой и приятной для жизни (Magdy, 2022; Dumbaugh & Li, 2010).

Кроме того, грамотное проектирование улиц в пределах городской среды имеет важное значение для уменьшения негативного экологического влияния, формирования более благоприятных условий для жизни и обеспечения устойчивого развития города. Рациональная организация уличных пространств предусматривает создание зеленых насаждений и парков вдоль дорог, что способствует улучшению качества атмосферного воздуха и снижению эффекта городского теплового острова. Растения и деревья играют важную роль в абсорбции углекислого газа и выработке кислорода, что способствует созданию комфортной и экологически безопасной городской среды (Меренков, 2023; Кашкин, 2005).

Город Астана представляет собой новый городской комплекс, который был основан и развивался с самого начала. В рамках этого строительства, в том числе в период с 2010-х годов, было проведено проектирование рассматриваемых улиц Байтурсынова и Алматы. Исходя из данного контекста, проектирование и организация новых улиц могли быть с учетом новых концепций и теории в сфере градостроительства и архитектуры. Была возможность принять во внимание различные аспекты безопасности, экологии, социологии и комфортности среды обитания.

Монополия автомобилей на городские улицы является глобальной проблемой в городах. Данной теме посвящено значительное количество работ иностранных ученых (Кашкин, 2005; Челноков и др., 2015).

Основная цель авторов исследования заключалась в том, чтобы привлечь внимание к устаревшему представлению об улице как простом маршруте от точки А до точки Б. Авторы утверждают, что улица должна выполнять не только функцию передвижения, но и стать рекреационным пространством, разделяющим автомобильные потоки и пешеходов, дорожные пути и жилые зоны, с тем чтобы создать социально комфортную среду.

В исследовании «Human-centered designs, characteristics of urban streets, and pedestrian perceptions» (Choi et al., 2016) авторы ставили перед собой цель проанализировать связь между принципами человекоориентированного градостроительного проектирования, особенностями физического облика городских улиц и их восприятием пешеходами. В рамках исследования рассматривается, как различные элементы городских улиц, такие как ширина, оборудование тротуаров, трафик и меры безопасности, влияют на опыт и восприятие пешеходами этих улиц. Исходя из целей исследования, потенциальным ограничением исследования является обобщаемость полученных результатов. К тому же исследования, фокусируемые на определенной географической области или ограничен-

ном наборе характеристик уличной среды, могут оказаться неприменимыми к другим местоположениям с различными городскими контекстами. Кроме того, так как исследование опирается на самостоятельно сообщенные восприятия пешеходов, есть вероятность субъективных предубеждений, что может снизить достоверность и надежность полученных результатов.

В работе «An Investigation into the Causes of Pedestrians' Walking Difficulties in Cairo Streets» (Magdy et al., 2022) авторы провели анализ факторов, влияющих на затруднения передвижения пешеходов по улицам Каира. В ходе исследования были рассмотрены различные аспекты, включая инфраструктуру, состояние дорог, наличие оборудования для пешеходов и решения в области градостроительства, которые могут повлиять на уровень комфорта и безопасности передвижения пешеходов. Результаты исследования послужили основой для рекомендаций по улучшению градостроительного планирования и дизайна с целью повышения уровня комфорта и безопасности пешеходов и решения проблем, связанных с их передвижением по улицам Каира. Однако стоит отметить, что данное исследование ограничено анализом только одного города, что затрудняет обобщение результатов на другие города с различной инфраструктурой и культурными особенностями. Кроме того, в работе не были учтены некоторые важные факторы, такие как социально-экономические аспекты, погодные условия или особенности транспортной инфраструктуры, которые также могут влиять на трудности передвижения пешеходов.

В работе «Designing for the Safety of Pedestrians, Cyclists, and Motorists in Urban Environments» (Dumbaugh & Li, 2010) авторы произвели анализ, который помог выявить требования к безопасности и основные проблемы, с которыми сталкиваются пешеходы, велосипедисты и водители в городской среде. Однако исследование не предлагает достаточно конкретных и реалистичных рекомендаций по улучшению безопасности для участников дорожного движения, так как целиком сфокусировано на факторах, влияющих на безопасность участников движения на улицах городов. (повтор мысли)

Таким образом, данное исследование отличается от существующих международных работ детальным анализом улицы в городе Астане, практическими рекомендациями с учетом экологической составляющей.

Материалы и методы исследования. В рамках данного исследования был применен комбинированный метод, сочетающий требования к сбору и анализу данных, что способствовало достижению поставленных целей. Особое внимание уделялось интеграции качественных и количественных подходов в процессе исследования.

Для изучения архитектурно-градостроительных характеристик выбранной улицы города использовался метод натурного обследования, который позволил детально рассмотреть более десяти объектов, включая улицы и общественные пространства, расположенные вдоль участка улицы Алматы в городе Астане. Собранные данные были упорядочены и проанализированы, а ключевые результаты представлены в данной статье.

Измерительный метод был применен авторами для измерения определенных параметров, явлений или характеристик в рамках научного исследования. Этот метод использовался для сбора данных, которые затем анализируются и интерпретируются с целью проверки гипотезы, подтверждения теории или достижения конкретных научных выводов.

В ходе проведенного исследования был осуществлен сбор и анализ разнообразных тематических материалов, включая научные статьи, литературные источники, а также архивные и проектные документы, связанные с областью градостроительства. Эти источники информации служили основой для выявления и анализа градостроительных проблем.

В рамках исследования были представлены практические рекомендации формирования рассматриваемой улицы.

Результаты и обсуждение. Современное состояние городской структуры крупных и крупнейших казахстанских городов и не только отражает деградацию дворовых, придомовых территорий, а также хаотичную структуру улиц. Во многих городах сложилась неблагоприятная ситуация: жилые и административные здания образуют бетонное окружение асфальтированных территорий, используемых преимущественно для хранения личных автомобилей. В такой обстановке сложно говорить о внедрении экологических принципов в архитектурное планирование или обеспечении комфортных условий для проживания и использования городских улиц, особенно если данные аспекты в лучшем случае учитываются только на стадии проектирования. Как видно на рис. 1 и 2, градостроительные нормы часто не соблюдаются.



Рисунок 1. Пример существующего положения на улице Алматы

Примечание – фото автора (Баракбаев, 2024)



Рисунок 2. Существующая структура улицы Байтурсынова

Примечание – фото автора (Баракбаев, 2024)

В казахстанских городах автомобили играют важную роль в транспортной системе и повседневной жизни жителей. Одной из основных проблем, связанных с монополией автомобилей, является транспортная зависимость. В большинстве казахстанских городов существует высокая зависимость от автомобильного транспорта как основного средства передвижения. Это приводит к дорожным пробкам, загрязнению воздуха, увеличению аварийности на дорогах и другим проблемам. Еще одним аспектом монополии автомобилей является недостаточная развитость альтернативных видов общественного транспорта. В Астане имеют место только два вида общественного транспорта – автобусы и такси, отсутствие других видов общественного транспорта стимулирует жителей и гостей города пользоваться индивидуальным автомобильным транспортом.

Это создает дополнительные проблемы для пешеходов и поддерживает доминирование автомобилей в городской среде.

Натурное обследование и анализ были проведены на двух улицах города Астаны. Эти улицы расположены в различных частях города, в новых районах (Есильский, Алматинский), проектирование которых начиналось с нуля (рис. 3).



- - улица Байтурсынова (Алматинский район)
- - улица Алматы (Есильский район)

Рисунок 3. Рассматриваемые улицы

Примечание – составлено автором на основе съемки Google Maps

Исследование и анализ данных улиц в городе Астане было проведено в связи с тем, что большинство улиц в городе имеют схожую структуру и архитектурные особенности. Изучение одной улицы позволяет составить общее представление о ключевых особенностях городской среды, включая используемые строительные материалы, схемы организации дорожного движения, наличие зон для пешеходов, зеленых насаждений, общественных пространств и других элементов, характерных для инфраструктуры города. Такой подход позволяет выявить общие тенденции развития городской среды, выделить сильные и слабые стороны городского планирования, а также предложить рекомендации по улучшению уличной инфраструктуры и созданию более комфортной и безопасной среды для жителей и гостей города.

Авторы, проведя натурное обследование и проанализировав улицы Байтурсынова и Алматы, разработали профиль этих улиц, представленный на рис. 4.



Рисунок 4. Существующее положение улиц в городской среде

Примечание – составлено автором (Мамедов, 2025)

Как видно на рис. 4, основное пространство улицы занимают зоны, предоставленные для автомобильного транспорта (парковки и дорога). Доля площадей улицы, выделенных для автомобильного транспорта, занимает 67 % от всех площадей улицы, тогда как зоны зеленых зон и пешеходного тротуара составляют 18,7 % и 17,2 % соответственно. Также необходимо отметить, что в немалых случаях входная группа субъектов частного предпринимательства занимает пространство пешеходных тротуаров и газонов. Данный факт, таким образом, сокращает без того небольшую долю пространств, выделенных для пешеходов и рекреационных зон.

При существующем положении структуры рассматриваемой улицы авторы исследования акцентируют внимание на двух группах проблем: социальных и экологических. К социальным проблемам авторы относят следующие факторы:

- Безопасность. Как видно на рис. 4, тротуары улицы находятся у дорог для автомобильного транспорта, что несет в себе определенные риски.

- Некомфортность передвижения по тротуарам. На рис. 4 видно, что в существующем положении тротуары улицы разделены и находятся между парковочными местами. Согласно табл. 13.2 – Основных расчетных параметров уличной сети города СНИП РК 3.01-01Ас-2007 Строительных норм и правил, планировки и застройки города Астаны, на магистральных улицах районного значения ширина пешеходной части тротуара должна быть не менее 3 м. Таким образом, согласно рис. 4, оба тротуара с правой стороны улицы имеют ширину 1,7 м и 2,7 м, что может говорить о несоблюдении требований норм.

- Не предусмотрены места для велосипедистов и самокатов. Данный факт приводит к тому, что велосипедисты и самокаты занимают и так недостаточное пространство, предназначенное для пешеходов. Более того, это приводит к увеличению риска дорожных происшествий.

- Не предусмотрены места отдыха для пешеходов. На рассматриваемой улице полностью отсутствует уличная мебель, а именно лавочки для отдыха.

- Наличие перепадов. Данный фактор представляет дополнительные трудности для лиц с ограниченными возможностями и маломобильных групп населения.

К экологическим проблемам авторы относят санитарно-гигиенические условия. Согласно общим положениям СНиПа РК 3.01-01Ас-2007, расстояния от жилых домов до автостоянок и въездов и выездов следует принимать в соответствии с таблицей 13.25. На основании данной таблицы расстояние автостоянки открытого типа и наземные автостоянки рампового типа в зависимости от вместимости должны находиться на расстоянии от 10 м и более. Таким образом, можно говорить о несоблюдении требований норм при проектировании улицы в части санитарно-гигиенических условий.

Несколько исследований, посвященных загрязнению атмосферы, показали, что растительные барьеры, сформированные из плотной и высокой растительности,

являются особенно эффективными в снижении концентрации загрязняющих веществ в воздухе (Рой, 2023; Мори и др., 2018). Однако, как видно на рис. 1 и 2, существующие озелененные территории в данном случае не выполняют значительной функции растительных барьеров для уменьшения уровня загрязняющих веществ в атмосфере.

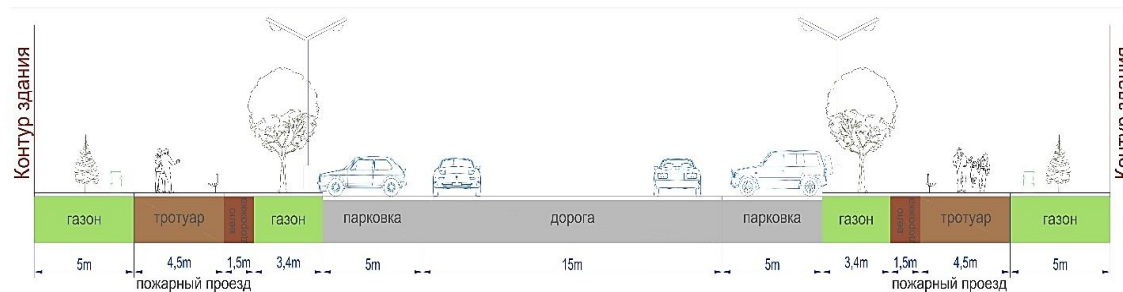


Рисунок 5. Предложения авторов по формированию улиц

Примечание – составлено автором (Мамедов, 2025)

Как показано на рис. 5, авторы предлагают увеличить долю пространств, предназначенных для газонов, с 18,7 % до 31,2 %. К тому же авторы считают необходимым добавить велосипедные дорожки в структуру улицы. Пространство, предназначенное для автомобильного транспорта, предлагается сократить с 63,9 % до 46,5 %. Вместе с тем долю пространств, предназначенную для пешеходов, предлагается сократить с 17,2 % до 16,7 %, и пересмотреть размещение тротуаров в уличной структуре. Таким образом, в контексте городского планирования и формирования структур улиц зеленые зоны приобретают функциональную значимость, направленную на защиту пешеходов и зданий от вредного воздействия шума и выбросов углекислого газа, исходящих от автотранспорта. Более того, тротуар в сочетании с велосипедной дорожкой также будет обладать функцией пожарного проезда (Мамедов, 2022; Абилов & Маметов, 2022).

Благодаря архитектурно-градостроительным решениям авторы выделяют следующие положительные результаты:

– Увеличение зеленых зон: увеличение доли зеленых зон на улицах снизит уровень шума и пыли от автотранспорта, что положительно скажется на окружающей среде и здоровье горожан. Зеленые насаждения также улучшат эстетику улиц и сделают пространство более привлекательным для прогулок и отдыха.

– Добавление велосипедных дорожек: включение велосипедных дорожек в структуру улиц позволит велосипедистам безопасно перемещаться, снизит риск дорожных происшествий и будет способствовать развитию здорового образа жизни.

– Пересмотр размещения тротуаров: пересмотр размещения тротуаров позволит оптимизировать использование пешеходных зон и обеспечить более комфортные условия для пешеходов. Это может предусматривать расширение пешеходных дорожек, обустройство зон для отдыха с установкой уличной мебели, а также добавление элементов ландшафтного дизайна, способствующих созданию комфортной и привлекательной городской среды.

– Функциональное использование пространства: учет функциональных потребностей пространства позволяет сделать его более эффективным и удобным для всех участников городской среды. Например, объединение тротуаров и велосипедных дорожек может создать многофункциональные зоны, которые будут использоваться как для передвижения, так и для отдыха.

– Экологические аспекты: повышение доли зеленых зон и уменьшение пространства, предназначенного для автотранспорта, снизит уровень загрязнения окружающей среды и улучшит качество воздуха. Это позитивно скажется на здоровье горожан и сделает улицу более пригодной для проживания.

Заключение. Устойчивое развитие городов тесно связано с необходимостью удовлетворения различных потребностей населения. Формирование городской среды в контексте ее устойчивого развития осуществляется в рамках градостроительной деятельности с акцентом на экологические приоритеты (градозэкологическое устройство территории). Для этого оценивается уровень экологической стабильности городской среды, который отражает состояние экосистемы и способность основных ее элементов к устойчивому воспроизводству (Корнилова & Лаптева, 2018).

Экологизация потребности в пространстве должна быть направлена на предоставление каждому жителю города экологически обоснованной территории, а также на недопущение переуплотненности улиц транспортными средствами. В соответствии с ключевыми задачами, такими как поддержание здоровья и активного долголетия, необходимо создание безопасной и благоприятной окружающей среды, обеспечение удобного доступа к объектам городской инфраструктуры, а также развитие экологически устойчивых производственной, транспортной и инженерно-технической систем.

Результаты данного исследования показывают так называемую «монополию автомобилей» в городе Астане. Как видно на существующей структуре улиц Байтурсынова и Алматы на рис. 3, основные площади улицы предоставлены автомобильным парковкам либо автомобильным дорогам. При этом авторы выявили нормативную слабость проектирования данных улиц, что непременно имеет влияние на экологическую и социальную составляющую улицы (Тойшиева и др, 2023).

Эти выводы подчеркивают необходимость пересмотра подходов к проектированию и организации уличной инфраструктуры в городе Астане. Учитывая роль улиц как важных элементов городского пространства, важно стремиться к созданию более устойчивой, экологически и социально ориентированной среды, которая учитывает потребности всех горожан и обеспечивает равные возможности для пешеходов, велосипедистов и других пользователей улицы. Это может включать создание широких тротуаров, велосипедных дорожек, зеленых насаждений и зон отдыха.

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 подобные технологии.

Список литературы

- Choi, J., Kim, S., Min D., Lee D., & Kim S. (2016). Human-centered designs, characteristics of urban streets, and pedestrian perceptions. *Journal of Advanced Transportation*, 50(2), 120–137. <https://doi.org/10.1002/atr.1323>
- Magdy J., Moussa R. R., & Konbr U. (2022). An investigation into the causes of pedestrians' walking difficulties in Cairo streets. *Civil Engineering and Architecture*, 10, 12–26. <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100102>
- Dumbaugh E., & Li W. (2010). Designing for the safety of pedestrians, cyclists, and motorists in urban environments. *Journal of the American Planning Association*, 77(1), 69–88. <https://doi.org/10.1080/01944363.2011.536101>
- Меренков А. В. & Янковская Ю. С. (2023). Зеленая архитектура. Формирование жилой среды: учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург: Лань, 156 с. // Merenkov A.V. & Yankovskaya Y.S. (2023). Green architecture. Formation of residential environment: a textbook for universities. Saint-Petersburg: Lan, 156 p.

- Кашкин Л. В. (2005). Основы градостроительства: учеб. пособие для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования. Москва: Гуманитар. Изд. Центр ВЛАДОС, 247 с. // Kashkin L. V. (2005). Fundamentals of urban planning: textbook for students of educational institutions of secondary vocational education. Moscow: Humanitarian. VLADOS Izd. Centre, 247 p.
- Челноков А. А., Ющенко Л. Ф., Григорьева Е. Е., & Саевич К. Ф. (2015). Экология городской среды: учеб. Пособие. Минск: Высшая школа, 368 с. // Chelnokov A. A., Yushchenko L. F., Grigorieva E. E., & Sayevich K. F. (2015). Ecology of urban environment: textbook. Minsk: Vyshaya Shkola, 368 p.
- СНИП РК 3.01-01Ac-2007. (2007). Строительные нормы и правила. Планировка и застройка города Астана. // SNiP RK 3.01-01Ac-2007. (2007). Construction norms and rules. Planning and development of the city of Astana.
- Приказ министра национальной экономики Республики Казахстан. (2015, 20 марта). Об утверждении Типовых правил содержания и защиты зеленых насаждений, правил благоустройства территорий городов и населенных пунктов и Правил оказания государственной услуги "Выдача разрешения на вырубку деревьев" № 235. // Order of the Minister of National Economy of the Republic of Kazakhstan. (2015, 20 March). On Approval of the Model Rules for the Maintenance and Protection of Green Plants, the Rules for the Improvement of the Territories of Cities and Settlements and the Rules for the Provision of the State Service 'Issuance of Permission to Cut Down Trees' No. 235.
- Рой О. М. (2023). Основы градостроительства и территориального планирования: учебник и практикум для вузов 2-е изд., Москва: Издательство Юрайт, 249 с. // Roy, O. M. (2023). Fundamentals of urban planning and territorial planning: textbook and practice for universities 2nd ed., Moscow: Yurait Publishing House, 249 p.
- Мори Д., Феррини Ф., & Сэбо, А. (2018). Снижение загрязнения воздуха за счет озеленения. Italus Hortus // Mori D., Ferrini F., & Sebo A. (2018). Reducing air pollution through landscaping. Italus Hortus.
doi:https://www.soihs.it/ItalusHortus/review_34_anno_25_2018_numero_1/air_pollution_mitigation_by_urban_greening.aspx
- Мамедов С. Э. (2022). Архитектурное проектирование многофункциональных жилых комплексов: учебное пособие. Алматы: Эверо, 248 с. // Mamedov S. E. (2022). Architectural design of multifunctional residential complexes: textbook. Almaty: Evero, 248 p.
- Абилов А.Ж., & Маметов А.А. (2022). Градостроительство и территориальное планирование в Казахстане: истоки и тенденции развития Алматы, 180 с. // Abilov A.J., & Mamedov A.A. (2022). Urban planning and territorial planning in Kazakhstan: origins and trends of development Almaty, 180 p.
- Корнилова А. А., & Лаптева И. В. (2018). Региональные особенности формирования генеральных планов городов: учебное пособие. Астана. Изд. КазАТУ им. С. Сейфуллина, 175 с. // Kornilova A. A., & Lapteva I. V. (2018). Regional peculiarities of the formation of general plans of cities: textbook. Astana. Izd. KazATU named after S. Seifullin, 175 p.
- Тойшиева А. А., Тойшиева А. Д., Мамедов С. Э., Арутюнян Э. П., Хван Е. Н., & Аманбай А. (2023). Развитие архитектуры жилых зданий с начала XX по XXI век (на примере Астаны). Civil Engineering and Architecture, 11(3), 1220–1233. // Toyshieva A. A., Toyshieva A. D., Mamedov S. E., Arutyunyan E. P., Khvan E. N., & Amanbai A. (2023). Development of architecture of residential buildings from the beginning of XX to XXI century (on the example of Astana). Civil Engineering and Architecture, 11(3), 1220-1233.

Information about authors

Muldagaliyeva Ainur Muratovna – PhD candidate, Kazakh Agrotechnical research university, Astana, Kazakhstan.

Mamedov Seimur Etibar ogly – PhD, Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Barakbayev Arslan Nurlanovich – PhD candidate, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana Kazakhstan.

Mussabayev Turlybek Turkpenovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NIA RK, RSE Gosgradkadastr, Astana, Kazakhstan.

Surankulov Shaizkhan Zhuvandykovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Astana Kazakhstan.

СӘУЛЕТ
АРХИТЕКТУРА
ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_313
MPHTI 67.07.03

А. Өжет^{1,2}, Т.Т. Мусабаев^{1,3}, С.Э. Мамедов³, Е.А. Феоктистова⁴, В.И. Наумова⁴

¹РГП «Госградкадастр», г. Астана, Казахстан

²Казахский агротехнический исследовательский университет имени С. Сейфуллина,
г. Астана, Казахстан

E-mail: Arshyn.novyj@bk.ru*

³Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

E-mail: eti.enu@mail.ru

E-mail: sp_proekt_stroy@bk.ru

⁴Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

E-mail: fea-45@rambler.ru

E-mail: VNaumova@ektu.kz

СБАЛАНСИРОВАННЫЕ АРХИТЕКТУРНО-ПЛАНИРОВОЧНЫЕ РЕШЕНИЯ ГЕНЕРАЛЬНЫХ ПЛАНОВ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ В СИСТЕМЕ ГОРОДА АСТАНЫ

АСТАНА ҚАЛАСЫНЫҢ ЖҮЙЕСІНДЕГІ ЖАЛПЫ БІЛІМ БЕРУ ҰЙЫМДАРЫ БАС ЖОСПАРЛАРЫНЫҢ ТЕҢГЕНДЕСТІРІЛГЕН СӘУЛЕТ-ЖОСПАРЛЫҚ ШЕШІМДЕРІ

BALANCED ARCHITECTURAL-PLANNING SOLUTIONS OF MASTER PLANS OF GENERAL EDUCATIONAL ORGANIZATIONS IN THE ASTANA CITY SYSTEM

Аннотация. Данная статья рассматривает важность сбалансированной интеграции архитектурно-планировочных решений генеральных планов общеобразовательных учреждений в систему города Астаны. Процесс разработки генеральных планов должен учитывать не только потребности конкретной школы, но и гармоничное взаимодействие с окружающей городской средой. Обсуждаются различные аспекты, такие как: озеленение, удобство доступа, безопасность и архитектурный стиль, которые необходимо учитывать при проектировании школьных территорий. Подчеркивается важность вовлечения различных заинтересованных сторон, включая городские власти, образовательные учреждения и общественность, для достижения оптимальных результатов. Данное исследование представляет собой набор конкретных рекомендаций, нацеленных на формирование целостной и оптимизированной инфраструктуры образовательных учреждений в городе Астане.

Ключевые слова: архитектурно-планировочные решения, общеобразовательная школа, урбанизация, функциональное зонирование, территория, озеленение, ландшафтный дизайн.

Аңдатпа. Бұл мақала жалпы білім беретін мекемелердің бас жоспарларының сәулет-жоспарлау шешімдерін Астана қаласы жүйесіне теңгерімді интеграциялаудың маңыздылығын қарастырады. Бас жоспарларды әзірлеу процесі белгілі бір мектептің қажеттіліктерін ғана емес, сонымен бірге қоршаған қалалық ортамен үйлесімді өзара әрекеттесуді де ескеруі керек. Мектеп алаңдарын жобалау кезінде ескеру қажет көгалдандыру, қол жетімділік, қауіпсіздік және сәулеттік стиль сияқты әртүрлі аспектілер талқыланады. Оңтайлы нәтижеге қол жеткізу үшін әртүрлі мүдделі тараптарды, соның ішінде қала, білім беру мекемелері мен жұртшылықты тартудың маңыздылығы атап өтіледі. Бұл зерттеу Астана қаласында білім беру мекемелерінің тұтас және оңтайландырылған инфрақұрылымын қалыптастыруға бағытталған нақты ұсынымдар жиынтығы болып табылады.

Ключевые слова: сәулет-жоспарлау шешімдері, жалпы білім беретін мектеп, урбанизация, функционалды аймақтарға бөлу, аумақ, көгалдандыру, ландшафт дизайны.

Annotation. *This article examines the importance of balanced integration of architectural and planning solutions of general plans of educational institutions into the Astana city system. The process of developing master plans should take into account not only the needs of a particular school, but also the harmonious interaction with the surrounding urban environment. Various aspects are discussed, such as landscaping, ease of access, security, and architectural style, which must be taken into account when designing school grounds. The importance of involving various stakeholders, including city authorities, educational institutions and the public, is emphasized in order to achieve optimal results. This study is a set of specific recommendations aimed at forming an integrated and optimized infrastructure of educational institutions in Astana.*

Keywords: *architectural and planning solutions, secondary school, urbanization, functional zoning, territory, landscaping, landscape design.*

Введение. В Астане процесс строительства новых учебных заведений стремительно развивается в связи с быстрым ростом населения и урбанизацией. (2,33 %) Однако, несмотря на возведение новых школ, наблюдаются значительные проблемы в благоустройстве их территорий. Недостаточное озеленение, нехватка шумоизоляции и организационные трудности с парковкой негативно сказываются на качестве образования и комфорте учащихся. Эти вопросы требуют внимательного рассмотрения и системного подхода к их решению, что делает данное исследование актуальным и значимым.

Образование играет существенную роль в социокультурной сфере и оказывает влияние на развитие городской среды. В связи с этим необходимость усовершенствования сети общеобразовательных учреждений в соответствии с изменениями, происходящими в обществе и на локальных территориях, обусловлена современными градостроительными требованиями и стремлением обеспечить удовлетворение потребностей в доступном и экологически устойчивом образовании в городской среде. Актуальными аспектами являются обеспечение доступности школ в уже застроенных районах, оптимизация существующей сети и выбор подходящих мест для строительства новых учебных заведений.

Целью данного исследования является выявление и анализ проблем использования территорий школ в Астане, разработка предложений по их решению для улучшения экологической ситуации, повышения комфорта и безопасности учащихся и учителей.

Новизна исследования заключается в комплексном анализе существующих проблем использования территорий школ в городе Астане, а также в разработке практических рекомендаций их решения. В исследовании акцент сделан на необходимость пересмотра процентного соотношения функциональных зон школьных территорий и регламентации строительных норм с учетом современных требований экологии, комфорта и безопасности. Для достижения поставленной цели требовалось:

- Провести анализ текущего состояния озеленения и ландшафтного дизайна школьных территорий;
- Изучить уровень шума и его влияние на учебный процесс в школах, расположенных вдоль магистральных улиц;
- Исследовать проблемы с парковкой и организацией транспортных потоков вблизи школ;
- Разработать рекомендации увеличения озелененных территорий и улучшения ландшафтного дизайна;
- Предложить меры улучшения шумоизоляции школьных зданий;
- Сформулировать предложения организация парковочных зон и оптимизации транспортных потоков;
- Подготовить рекомендации по пересмотру процентного соотношения функциональных зон школьных территорий и регламентации строительных норм.

Таким образом, данное исследование направлено на комплексное улучшение использования территорий школ в городе Астане. Внедрение предложенных решений и рекомендаций позволит создать комфортные, безопасные и экологически благоприятные условия для обучения, что, в свою очередь, положительно скажется на качестве образования и общем развитии городской инфраструктуры.

Материалы и методы исследования. В исследовании использовались:

1) теоретический обзор литературы, в рамках которого изучались генеральные планы (ГП) общеобразовательных учреждений и их значимость в современном развитии общества;

2) метод анализа проектных документов; на начальной стадии данного исследования осуществлялся сбор литературного и научного материала, затем был реализован анализ данных;

3) при разработке вариантов архитектурно-планировочных решений, оказывающих влияние на уровень комфортности школ, применялся метод архитектурного проектирования. Также использовался метод графического построения, который способствовал визуализации и анализу предложенных решений.

4) метод сравнительного анализа выражался в сравнении методов, используемых общеобразовательных учреждений;

5) на завершающем этапе, учитывая масштабность проведенного исследования, осуществляется уточнение и обобщение полученных данных. Для этого применяется метод обобщения результатов, который позволяет систематизировать и структурировать информацию.

Результаты и их обсуждение. Исследование использования территорий школ, озеленения и шумоизоляции в образовательных учреждениях активно обсуждается как в отечественной, так и в зарубежной литературе. В последние годы внимание к этой теме значительно возросло в связи с увеличением урбанизации и изменением подходов к проектированию образовательных учреждений.

Концепция шаговой доступности школ берет свое начало из идей городского планирования конца XIX и начала XX веков. Первые обсуждения необходимости создания школ в шаговой доступности можно найти в трудах американского социолога и урбаниста Джейн Джейкобс, которая в своей книге «Смерть и жизнь великих американских городов» подчеркивала важность пешеходной доступности образовательных учреждений. (Джейкоб, 2011).

В последние десятилетия исследования в области шаговой доступности школ активно развиваются. В работах Тима Билла из Университета Шеффилда и Джона Паркинса из Университета Беркли акцентируется внимание на значимости шаговой доступности для улучшения здоровья детей и снижения нагрузки на городскую инфраструктуру.

Озеленение и ландшафтный дизайн. В зарубежной литературе, в том числе исследованиях профессора Тима Билла из Университета Шеффилда, акцентируется внимание на значимости озелененных территорий в школах для улучшения когнитивных функций учащихся и создания благоприятной экологической обстановки. Исследования показывают, что зеленые зоны не только способствуют улучшению ментального здоровья учащихся, но и служат природными барьерами от шума и загрязнения (Bill, 2020).

В работах авторов стран СНГ, таких как Татьяна С. и Ирина К., также отмечается важность озеленения школьных территорий (Collins, 2021). Однако, несмотря на общепризнанные преимущества, в Казахстане все еще недостаточно внимания уделяется практике ландшафтного дизайна в образовательных учреждениях.

Шумоизоляция. Вопросы шумоизоляции активно исследуются зарубежными авторами. Например, работы Марка Куллинса из Университета Саутгемптона демонстрируют, что

высокий уровень шума в школах, расположенных вдоль магистральных улиц, негативно влияет на концентрацию и успеваемость учащихся (Иванов, 2015). В результате в странах Европы активно применяются технологии шумозащиты, такие как установка звукоизоляционных окон и создание зеленых барьеров.

Отечественные исследования по данной теме менее обширны. Однако работы Иванова Ю. подтверждают необходимость внедрения шумоизоляционных технологий в школах, расположенных вблизи магистралей, для создания комфортной учебной среды (Parkins, 2022).

Организация парковочных зон и транспортных потоков. Вопросы транспортной доступности и организации парковочных зон активно обсуждаются в контексте урбанистики. В работах зарубежных авторов, таких как исследования Джона Паркинса из Университета Беркли, акцентируется внимание на важности безопасной и удобной организации транспортных потоков вокруг школ (Смирнова, & Коваленко, 2019). В странах с высокой плотностью населения разработаны системы одностороннего движения и специальные зоны для высадки детей.

В Казахстане данный аспект также требует внимания. Исследования отечественных авторов, таких как Мамедов С.Э. и Соколова М., подтверждают, что неэффективная организация парковочных зон приводит к транспортным заторам и создает опасные ситуации для детей (Мамедов, 2020).

Отличия авторской работы от ранее опубликованных. Новизна данного исследования заключается в комплексном подходе к анализу использования территорий школ в Астане. В отличие от предыдущих работ, авторское исследование объединяет несколько ключевых аспектов: озеленение, шумоизоляцию и организацию транспортных потоков. Ранее публикации обычно фокусировались на одном из этих аспектов, не учитывая их взаимосвязи и комплексного влияния на образовательный процесс и комфорт учащихся.

Кроме того, авторское исследование включает разработку конкретных рекомендаций пересмотра процентного соотношения функциональных зон и регламентации строительных норм, что ранее не было предметом столь детального рассмотрения в отечественной литературе. Это позволяет предложить более структурированные и практичные решения для улучшения использования территорий школ в городе Астане.

В Астане на сегодня функционирует 171 общеобразовательная школа, из них 101 – государственная, 63 – частные, 7 – республиканского значения. Однако из-за роста количества детей школьного возраста увеличивается потребность в учебных местах. К примеру, в столице проживают 259 тысяч детей школьного возраста. Из них 27 тысяч в 2023 году пошли в 1-й класс. По сравнению с 2022 годом количество детей в этом году увеличилось на 22 тысячи (Соколова, 2020).

Для решения вопроса в столице строятся новые учебные заведения. Однако генеральные планы и использование их территорий остаются нерегулированными и требуют улучшений. Важными аспектами являются озеленение, ландшафтный дизайн, шумозащита, а также организация функциональных зон. В данной статье анализируются текущие проблемы использования школьных территорий и предлагаются решения для улучшения ситуации.

Государственное управление, в том числе в сфере общеобразовательных учреждений, активно применяет нормирование как один из ключевых инструментов регулирования, основывающийся на научных принципах теории экономического управления (Марк, 2000). Политика государства находит свое выражение в разработке и внедрении различных нормативов, которые отражают особенности регулирования. Характерной чертой таких нормативных показателей является их относительная природа, условность и

необходимость регулярного пересмотра. Согласно Градостроительному нормативу Республики Казахстан (СН РК 01-03-2013), материалы, относящиеся к планированию размещения объектов местного значения, включая общеобразовательные организации, публикуются в рамках Генерального плана местных исполнительных органов (МИО) (СН РК 01-03-2013).

В Румынии, Чехословакии, США нормы площади участков на одного ученика отличаются: около 25 м² в Румынии, 27 м² в Чехословакии и около 100 м² в США. Методы планирования и размещения школ в различных странах заметно отличаются от подходов, применяемых в Казахстане. В отечественной практике сохраняются принципы, сформированные в советский период, которые основывались на необходимости обеспечения шаговой доступности образовательных учреждений для населения в пределах радиуса не более 500 метров. Такой подход определил размещение школ в пределах микрорайонов, что дало возможность использовать их как структурный элемент территориального планирования, ориентированного на создание зон обслуживания.

Анализ расположения объектов повседневного радиуса обслуживания свидетельствует о недостаточном развитии школьной инфраструктуры в районе Сарыарка города Астаны. Наибольшая концентрация школ наблюдается в центральной части исторического района, что указывает на нехватку образовательных учреждений в периферийных зонах. Нерациональное размещение объектов социальной инфраструктуры, таких как общеобразовательные школы в микрорайонах города, приводит к увеличению числа учеников в классах (Позняк, 2009).

Планировка территории школьного участка определяется рядом факторов, включая градостроительные условия (такие как форма и размер участка). Количество этажей здания общеобразовательной школы, геометрическая структура элементов участка и другие характеристики оказывают значительное влияние на его функциональность. Действующие нормативы, устанавливающие ограничение высоты школьных зданий до трех этажей, способствуют более рациональному и эффективному использованию территории пришкольного участка как для образовательных, так и для рекреационных целей. Например, распределение входов и гардеробов с учетом возрастных групп учащихся способствует улучшению функциональности территории. Однако такие ограничения этажности для школ с большой вместимостью порождают определенные сложности как в плане проектирования, так и в экономическом аспекте.

Повышение этажности зданий позволяет сократить площадь застройки и земельные участки, выделяемые под школы, что особенно важно в условиях высокой стоимости земли в городах. Например, за 4 минуты возможно эвакуировать 960 учеников из четырехэтажной школы через две лестницы, тогда как для пятиэтажного здания на 1000 мест время эвакуации увеличивается до 8–10 минут, что сравнимо с длительностью обычной перемены. При таких условиях проведение перемен на открытом воздухе становится затруднительным, даже если на школьной территории предусмотрены соответствующие зоны.

В Германии по заказу Министерства образования и науки было проведено исследование, посвященное анализу влияния увеличения этажности школьных зданий на их строительство, эксплуатацию и размещение. В рамках исследования рассматривались различные варианты изменения соотношений площадей функциональных помещений, таких как зоны для занятий физической активностью и рекреации, расположенных как внутри зданий, так и на прилегающих территориях. Было установлено, что увеличение этажности оказывает влияние на качество и оснащение вертикальных и горизонтальных коммуникаций, а также на время, которое ученики тратят на перемещения внутри здания.

Использование лифтов в многоэтажных школах позволяет значительно сократить временные затраты на передвижение. Кроме того, применение методов поэтажного зонирования способствует повышению функциональности школьных зданий и снижению расходов, связанных с приобретением или арендой земельных участков.

Результаты исследования показали следующие выводы:

1. Затраты на строительство трехэтажного школьного здания несколько ниже, чем одноэтажного, однако строительство четырехэтажной школы увеличивает расходы на 8 %, а при дальнейшем увеличении этажности затраты продолжают расти.

2. Эксплуатационные расходы для школ с пятью или шестью этажами увеличиваются на 3-5 %, главным образом из-за необходимости установки лифтов.

3. Время вертикальных перемещений учащихся по лестницам пропорционально числу этажей. Например, в десятиэтажной школе оно увеличивается примерно в семь раз по сравнению с двухэтажной, а в двенадцатиэтажной – в четыре раза больше, чем в шестиэтажной школе.

4. Напротив, горизонтальные перемещения уменьшаются с увеличением этажности: учащиеся двухэтажных школ проходят около 6 км в неделю, тогда как в шестиэтажных – почти в два раза меньше. Наименьшее время на переходы теряют ученики пяти- и шестиэтажных школ.

Сокращение площади пришкольного участка до 10,2-5,8 м² на одного ученика возможно благодаря использованию эксплуатируемых кровель, которые компенсируют уменьшение площади застройки. Высота школьного здания и ее взаимодействие с прилегающей территорией могут быть адаптированы в соответствии с конкретными условиями градостроительства. Это особенно важно как для проектирования новых образовательных учреждений, так и для модернизации существующих школ, изначально спроектированных без учета необходимой связи между учебными помещениями и прилегающей территорией. Современные педагогические и санитарные требования подчеркивают необходимость такой связи, что ставит перед проектировщиками задачу перехода от типового подхода к индивидуальному проектированию школьных участков (Сарсембаева, 2020).

К примеру, в современной типовой школе на 1176 учащихся зона отдыха занимает 1750 м². Эта территория включает площадки для подвижных игр для 1-2 классов (600 м²), 3-4 классов (600 м²), 5-8 классов (300 м²) и зону для тихого отдыха площадью 225 м².

В Казахстане согласно СП РК 3.02-111-2012 Общеобразовательные организации, пункту 4.2.2 общая площадь земельного участка общеобразовательной организации принимается из расчета при вместимости обучающихся свыше:

- а) 25 до 300 обучающихся – не менее 43 м² на 1 обучающегося;
- б) 300 до 600 обучающихся – не менее 34 м² на 1 обучающегося;
- в) 600 до 900 обучающихся – не менее 23 м² на 1 обучающегося;
- г) 900 до 1200 обучающихся – не менее 19 м² на 1 обучающегося;

д) до 3000 обучающихся – в стесненных условиях для крупных городов по заданию на проектирование в соответствии с выданным архитектурно-планировочным заданием (Dudek, 2012).

В ходе проведенных исследований было выявлено, что в большинстве школ зоны отдыха не обладают необходимым уровнем благоустройства и практически не используются учащимися. Это связано с ограничениями, накладываемыми учителями на выход учеников на улицу во время перемен. Хотя физическая активность положительно влияет на усвоение учебного материала, современные школы сталкиваются с рядом объективных проблем: значительная этажность зданий (до 4 этажей), недостаточная площадь гардеробов, неблагоприятные климатические условия и недостаточный уровень

благоустройства территорий (например, отсутствие ограждений). Более рациональным решением могло бы стать уменьшение площади зон отдыха с одновременным обустройством защитных навесов, как это практикуется в скандинавских странах.

В то же время результаты обследований школ в Астане показали, что, несмотря на планируемое благоустройство территорий и наличие крупных рекреационных площадок, связь между школьным зданием и прилегающим участком остается проблемной по нескольким причинам. Во-первых, эти территории требуют постоянных финансовых вложений для поддержания их функционального состояния. Во-вторых, согласно санитарно-эпидемиологическим требованиям Министерства здравоохранения, в Астане разрешено строительство школьных зданий высотой не более пяти этажей, что ограничивает доступ учеников на пришкольный участок во время перемен. Наконец, климатические условия региона также играют важную роль: количество солнечных дней в учебный период с сентября по май составляет в среднем всего 97 дней при 270 пасмурных. Это создает дополнительные трудности для полноценного использования рекреационных зон в течение учебного года.

Таблица 1. Таблица Ж.1 – Площади школ на 12, 24, 36 и 48 классов (общеобразовательные организации) (СП РК 3.02-111-2012)

Площадь, м ² , не более	Вместимость общеобразовательной организации			
	300 обучающихся 12 классов	600 обучающихся 24 класса	900 обучающихся 36 классов	1200 обучающихся 48 классов
Общая площадь выше отметки 0,000	5054,148	7384,212	8838,875	11334,5
Общая площадь на 1 обучающегося, м ²	16,85	12,31	9,82	9,45

Примечания:

1. Площади общеобразовательных организаций вместимостью до 3000 обучающихся рассчитываются аналогичным методом в соответствии с количеством необходимых помещений, указанных в задании на проектирование, согласованном с органами образования.
2. Эмпирический коэффициент отношения общей площади к расчетной принят для школы на 12 и 24 класса – 1,32; для школы на 36 и 48 классов – 1,25.
3. В обоснованных случаях допускается увеличение общей площади в пределах 5 %.

– составлено автором (Өжет, 2024)

В условиях плотной застройки крупных городов допускается сокращение общей площади земельного участка, выделяемого для общеобразовательных организаций, на 30 %. Такое уменьшение площади обусловлено необходимостью рационального использования ограниченных территорий и адаптации к городским условиям.

Размеры земельных участков школ могут быть: уменьшены на 20 % – в условиях реконструкции; увеличены на 30 % – в сельских населенных пунктах, если для организации учебно-опытной работы не предусмотрены специальные участки на иных землях (крестьянские хозяйства). Согласно пункту 4.2.13, площадь озеленения на территории общеобразовательной организации должна составлять не менее 10 % от общей площади земельного участка (СН РК 3.02-11-2011).

Недостаточное озеленение и ландшафтный дизайн. В настоящее время территории многих школ в Астане недостаточно озеленены. Часто можно наблюдать большие пустые пространства, которые могли бы быть использованы более эффективно. Количество посаженных деревьев и кустарников значительно ниже оптимального уровня, что негативно сказывается на экологии и эстетике школьных территорий.

Отсутствие шумоизоляции. Множество школ расположены вдоль магистральных улиц, что приводит к значительному уровню шума. Отсутствие должной шумоизоляции сказывается на комфорте учащихся и учителей, затрудняя проведение занятий и снижая концентрацию внимания.

Проблемы с парковкой и транспортной доступностью. Парковочные зоны школ часто не рассчитаны на необходимое количество транспорта. В часы пик наблюдаются значительные заторы, что создает неудобства для родителей и сотрудников школ. Проблема усугубляется отсутствием четкой организации потоков движения на прилегающих территориях.

Результаты для улучшения ситуации. Увеличение озелененных территорий. Для улучшения экологической ситуации и создания комфортных условий для учащихся и педагогов необходимо увеличить количество озелененных территорий. Важно учитывать посадку деревьев, создание газонов и цветников. Ландшафтный дизайн должен включать зоны отдыха и образовательные элементы, такие как учебные сады или мини-ботанические сады.

Улучшение шумоизоляции. Для решения проблемы шума необходима установка шумоизоляционных барьеров вдоль магистралей, использование специальных окон и дверей в зданиях школ. Дополнительно можно рассмотреть возможность создания зеленых насаждений, которые будут служить естественным барьером для шума.

Организация парковочных зон и транспортных потоков. Важно пересмотреть планирование парковочных зон и потоков транспорта. Необходимо предусмотреть достаточное количество мест для парковки, а также организовать безопасные подъезды и выезды с территории школ. Введение системы одностороннего движения или зон для высадки и посадки детей может существенно улучшить ситуацию.

Школьные территории в Астане часто используются неэффективно в зимний и летний периоды. Климатические условия города с суровыми зимами и жарким летом создают дополнительные вызовы для поддержания функциональности и привлекательности школьных площадок.

Зимний период. В зимний период большинство открытых пространств школьных территорий остаются неиспользованными. Из-за низких температур, снега и льда школьные дворы и спортивные площадки становятся недоступными для учащихся. Это приводит к снижению уровня физической активности среди детей и ограничивает возможности для проведения внеклассных мероприятий на свежем воздухе.

Летний период. Летом, несмотря на благоприятные погодные условия, школьные территории часто остаются пустыми. Основные причины включают в себя отсутствие организованных программ летнего отдыха и недостаточную инфраструктуру для активного использования территорий. Нехватка тенистых зон и озеленения делает пребывание на школьных площадках неудобным из-за высокой температуры и прямого солнечного света.

Таким образом, можно выделить следующую функционально-планировочную структуру современной пришкольной территории, сформировавшуюся исторически (в порядке возникновения зон):

- Хозяйственная зона – занимает 4 % площади участка;
- Рекреационная зона – составляет 20 % площади участка;
- Спортивная зона – охватывает 31 % площади участка;
- Учебно-опытная зона – включает 15 % площади участка;
- Зона зеленых насаждений (или представительская зона для школ, лишенных актового зала) – составляет 10 % площади участка;

Площадь застройки занимает 10 % площади участка.

Данная структура отражает традиционное функциональное зонирование, характерное для организации школьных территорий.

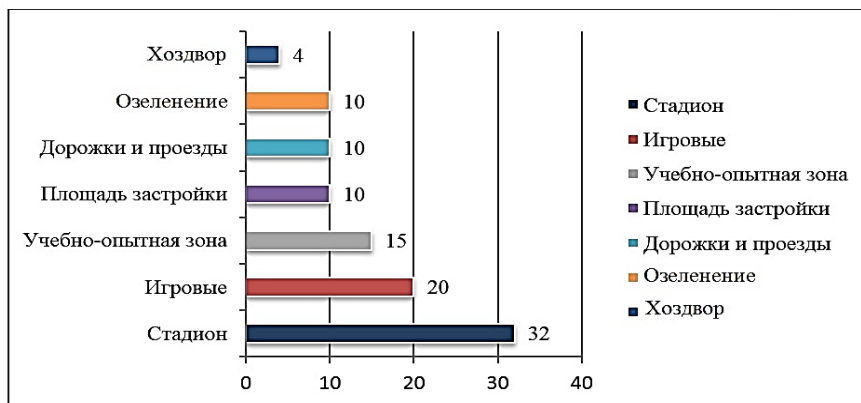


Рисунок 1. Территория современных школ на 2000 человек согласно СН РК 3.02-11-2011, % площадь участка

Примечание – диаграмма составлена автором (Өжет, 2024)

Исследования показали, что недостаток или отсутствие некоторых зон на пришкольных участках в большинстве случаев удалось компенсировать путем реконструкции и дополнительного строительства спортивных и актовых залов. Такой подход позволил значительно продлить срок актуальности школьных зданий и отсрочить их моральное старение (Москомархитектура, 1997). Однако в случаях, когда ограниченные размеры участка не позволяли осуществить подобные изменения, здания утрачивали свою образовательную функцию (Коровина, 2016). Унифицированные подходы и стандартизированные требования к организации пришкольных территорий, которые не учитывают специфику школы и климатические условия региона, стали причиной низкой эффективности использования таких участков (рис. 1).

Рекомендации по генеральным планам. Пересмотр процентного соотношения функциональных зон. Генеральные планы школ должны предусматривать оптимальное соотношение функциональных зон: учебных, спортивных, рекреационных и хозяйственных. Рекомендуется увеличить долю озелененных территорий и зон отдыха, что способствует не только улучшению экологии, но и общей атмосферы учебного заведения.

Регламентация строительных норм. Необходимо пересмотреть и дополнить существующие строительные нормы и правила, регулирующие использование территорий школ. Важно установить минимальные требования к озеленению, шумоизоляции и организации парковочных зон. Это позволит создать более комфортные и безопасные условия для всех участников образовательного процесса.

Эффективное использование территорий школ в Астане требует комплексного подхода и пересмотра существующих стандартов. Внедрение предложенных решений позволит улучшить экологическую обстановку, повысить комфорт и безопасность учащихся и педагогов, а также оптимизировать транспортные потоки вблизи школ. Пересмотр генеральных планов и регламентация строительных норм являются ключевыми шагами на пути к созданию современных и функциональных образовательных учреждений.

Заключение. В современном мире, где каждый метр земли ценен, оправданное и эффективное использование территории школы становится неотъемлемым элементом обеспечения полноценного образования и развития детей. Однако статистика говорит о том, что более 66 % территории школ в Астане во время учебного периода в сентябре-мае в среднем при 270 пасмурных дней либо не используется по назначению, либо

используется частично, что поднимает серьезные вопросы о планировке, уходе и эффективном использовании этих пространств.

Одним из возможных решений этой проблемы является пересмотр планировки и дизайна школьной территории с учетом местных климатических условий и потребностей обучающихся. Это может включать в себя переосмысление расположения зданий и объектов на территории, более эффективное использование пространства для создания озелененных зон и обустройства детских площадок. Усиленное внимание к регулярному уходу за территорией может сделать школьные пространства более привлекательными и функциональными.

Проблема неэффективного использования школьной территории в Казахстане требует немедленных и системных мер для обеспечения оптимальной среды обучения и развития детей. В контексте строительных норм и стандартов страны необходимо рассмотреть следующие решения:

1. Увеличение озеленения: внедрение нормативов в строительные нормы Республики Казахстан, которые предусматривают увеличение процентного соотношения озеленения на каждого учащегося вместо неиспользуемых участков, станет ключевым шагом к улучшению экологической среды школьных территорий. Это позволит не только сделать пространство более пригодным для обучения, но и создать зоны отдыха и активного времяпрепровождения для детей.

2. Создание крытых детских площадок: обустроить крытые детские площадки, выполненные из дерева или каучука, что способствует безопасности и комфорту детей при любых погодных условиях. Нормирование и учет климатических особенностей при выборе материалов для площадок поможет создать долговечные и удобные объекты.

3. Организация уроков на свежем воздухе: при проектировании школьных территорий следует предусмотреть зоны для проведения уроков под открытым небом. Это позволит детям наслаждаться свежим воздухом и природой во время обучения, что способствует их здоровью и активности.

4. Обеспечение шаговой доступности и парковок: при проектировании территорий школ необходимо учитывать доступность для пешеходов и предусматривать удобные парковочные места для автомобилей родителей. Это позволит избежать проблем с транспортом и создаст комфортные условия для всех участников образовательного процесса.

Реализация данных мер требует согласованных действий со стороны государственных органов, образовательных учреждений, а также активного участия общественности. Только через совместные усилия сможем создать благоприятную и продуктивную среду обучения для детей.

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 авторы не использовали ИИ.

Список литературы

- Джейкоб Д. (2011) Смерть и жизнь больших американских городов / Пер. с англ. – М.: Новое издательство. – 460 с. <https://doi.org/10.1210/ISBN978-5-98379-149-7//> Jacobs J. (2011). The Death and Life of Great American Cities (Russian translation). Новое издательство, <https://doi.org/10.1210/ISBN978-5-98379-149-7>. – 460 p.
- Bill, T. (2022). The Role of Green Spaces in Schools. University of Sheffield. Main Report (Part 1 of 2). – 112 p.
- Смирнова, Т., & Коваленко, И. (2019). Озеленение территорий школ: проблемы и перспективы. 2-е изд. М: Издательство «Лань», 2019. 344 с. // Smirnova T., Kovalenko I. (2019). Greening School Areas: Problems and Prospects. 2nd ed. M: Publishing House "Lan", 2019. – 344 p.

- Collins, M. (2021). Noise Pollution and Academic Performance. University of Southampton. Report (Part 1 of 2). – 241 p.
- Иванов Ю. (2015). Шумоизоляция в образовательных учреждениях. Шумоизоляция автомобилей: методические указания / Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2015. – 73 с. // Ivanov Y. (2015). Soundproofing in Educational Institutions. Parkins, J. Safe School Transport Planning. Orenburg State Univ. – Orenburg: OSU, 2015. – 73 p.
- Мамедов С.Э. (2021). Роль урбанистики в архитектурном проектировании, <https://doi.org/10.1109/334-338> с. // Mamedov S.E. (2021). The Role of Urbanism in Architectural Design, <https://doi.org/10.1109/334-338> p.
- Соколова, М. (2021). Проблемы организации парковочных зон вблизи школ. IV Международная научно-практическая конференция «Экологическая безопасность и устойчивое развитие урбанизированных территорий» DOI: 10.11845/esurd.2021.045 254-260 с. // Sokolova M. (2020). Problems of Organizing Parking Areas Near Schools DOI: 10.11845/esurd.2021.045-254-260 p.
- Дудек М. (2000). Мектептер архитектурасы: жаңа оқу орталары. Архитектуралық баспасөз, 238 бет. // Dudek M. (2000). School Architecture: New Learning Environments. Architectural Press, 238 pages. ISBN 0750635851, 9780750635851. /ISBN 0750635851, 9780750635851/. 2000. - 238 p.
- Позняк С.В. (2009) Архитектурно-планировочная организация здания школы в информационном обществе: дис. канд...18.00.02. – Самара. – 264 с. // Poznyak S.V. (2009). Architectural and Planning Organization of School Buildings in the Information Society:18.00.02 PhD Dissertation, Samara, 264 p.
- Сарсембаева Д.Е. (2019). Перспективы развития архитектуры социальной инфраструктуры общеобразовательных школ в городе Нур-султан (Астана): Матер. Международной научно-теор. конф. «Сейфуллинские чтения – 15: Молодежь, наука, технологии – новые идеи и перспективы», приуроченной к 125 - летию С. Сейфуллина. – Т. I. – Ч. 2. – 40-43 с. // Sarsembayeva D.E. (2019). Prospects for the Development of Social Infrastructure Architecture of Secondary Schools in Nur-Sultan (Astana). Proceedings of the International Scientific and Theoretical Conference «Seifullin Readings – 15: Youth, Science, Technology – New Ideas and Prospects», vol. I, part 2, 40-43 p.
- Dudek M. (2012) Dudek M. Architecture of schools: The new learning environments. – Routledge, 2012. – 64 p.
- СП РК 3.02-111-2012 Общеобразовательные организации 37 с. // SP RK 3.02-111-2012 General educational organizations 37 p.
- СН РК 3.02-11-2011 Общеобразовательные организации 29 р. // СН РК 3.02-11-2011 Общеобразовательные организации 29 p.
- Москомархитектура, Правительство Москвы, (2004) Рекомендации по обновлению и модернизации существующего фонда школьных зданий в соответствии с современными образовательными стандартами. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meganorm.ru/Data1/5/5393/index.htm>
- Коровина Е.И. (2016) Проектирование типовых школ нового поколения на основе модульного подхода // Сб. науч. статей междунар. исслед. организации "Cognitio" по итогам XVIII междунар. научно-практ. конф. «Актуальные вызовы науки XXI века» – Международная исследовательская организация "Cognitio", 2016. – 144 с. // Korovina E.I. (2016) Design of model schools of a new generation based on a modular approach // Collection of scientific articles of the international research organization "Cognitio" based on the results of the XVIII international scientific and practical conf. "Current challenges of science of the 21st century" – International research organization "Cognitio", 2016. – 144 p.

Information about authors

Ozhet Arshyn – author for correspondence, PhD student in the specialty – (D-122) "Architecture". S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Zhenis Avenue, 62, 010000, Astana, Kazakhstan.

Musabaev Turlybek Turkpenovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of NIA RK, 8 Mangilik el st, 010000, Astana, Kazakhstan.

Mamedov Seimur Etibaroguly – Doctor PhD, n. v. practice-associate professor of the Department of «Architecture» S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, Zhenis Avenue, 62, 010000, Astana, Kazakhstan.

Feoktistova Yelena Alexandrovna – Candidate of Architecture, School of Architecture, Construction and Energy, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, st. Serikbayeva, 19, 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan.

Naumova Vera Ivanovna – Candidate of Architecture, Associate Professor of the Higher Attestation Commission, Associate Professor of the School of Architecture, Construction and Energy, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, 19, 070004, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

ҚҰРЫЛЫС МАТЕРИАЛДАРЫ ЖӘНЕ БҰЙЫМДАРЫ
СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ
BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_324
MFTAA 67.09.43

М.Ж. Рыскалиев¹, С.М. Жарылгапов¹, Е.Б. Мажитов¹, А.Б. Кыдырашев¹
Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық - техникалық университеті,
Орал қ., Қазақстан
E-mail: muratbai_84@mail.ru*
E-mail: sabit.raisa@mail.ru
E-mail: mazhitov201090@gmail.com
E-mail: a.kydrashov@mail.ru

ЦЕМЕНТ ТАСЫНЫҢ ҚАТАЮ ПРОЦЕСТЕРІНЕ КӨБІК ТҮЗГІШТІҢ ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ НА ПРОЦЕССЫ
ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THE FOAMING AGENT ON THE HARDENING
PROCESSES OF CEMENT STONE**

Аңдатпа. Мәліметтерді талдау көбік түзетін агентті аз тұтыну кезінде цемент тасының беріктігінің жоғарылауы байқалады, ал жоғары тұтыну кезінде беріктіктің төмендеуі байқалады. Максималды беріктікке биосурфактантты қоспаны тұтыну 0,4 %, ал «Неопор» цемент салмағы бойынша 0,6 %, ол 5 % артады. Цемент гидратациясының және цемент тасының қатаюының кейбір бастапқы баяулауы 1-3 күндік жаста өтеледі. Құрамында көбік түзетін заттың жоғары болуымен беріктіктің төмендеуі цементтің гидратациясының баяулауымен және цемент тасының құрылым түзілуінің баяулауымен байланысты. Қоспада көбік түзетін заттың көп шығыны кезінде төмен молекулалық заттардың мөлшері цементтің гидратациясы айтарлықтай баяулайтын мөлшерге жетеді. Зерттеудің көрсеткеніндей, цементтің гидратация дәрежесі беттік-активті қоспаның мөлшеріне байланысты. Көбік түзетін қоспаның концентрациясы ең алдымен цемент тасының сандық фазалық құрамына әсер ететіні анықталды. Гидрат фазаларының сапалық құрамы қоспаның құрамына қарамастан тұрақты болып қалады. Жоғары концентрацияларда беттік-белсенді заттардың молекулалары цемент гидратациясының баяулауымен бірге жүретін бастапқы цемент түйіршіктерінің және нәтижесінде пайда болатын гидрат фазаларының бетіне адсорбцияланады.

Түйін сөздер: қатаю, көбік түзуші, цемент, гидратация, көбікбетон, цементтің қату уақыты, беріктік, құрылым

Аннотация. Анализ данных показывает, что при малом расходе пенообразователя наблюдается рост прочности цементного камня, а при большом расходе происходит снижение прочности. Максимальная прочность достигается при расходе добавки биоПАВ 0,4 %, а «Неопор» 0,6 % от массы цемента, она возрастает 5 %. Некоторое начальное замедление гидратации цемента и твердение цементного камня компенсируется уже в возрасте 1-3-х сут. Снижение прочности при высоком содержании пенообразователя обусловлено замедлением гидратации цемента и замедлением структурообразования цементного камня. При большом расходе пенообразователя в смеси содержание низкомолекулярных веществ достигает такого количества, при котором сильно замедляется гидратация цемента. Исследование показывает, что степень гидратации цемента зависит от количества поверхностно-активной добавки. Установлено, что концентрация пенообразующей добавки влияет преимущественно на количественный фазовый состав цементного камня. Качественный состав гидратных фаз остается постоянным независимо от содержания добавки. При повышенных концентрациях молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности зерен исходного цемента и образующихся гидратных фаз, что сопровождается замедлением гидратации цемента

Ключевые слова: затвердевание, пенообразователь, цемент, гидратация, пенобетон, время затвердевания цемента, прочность, структура

Abstract. Data analysis shows that with a low consumption of foaming agent, an increase in the strength of cement stone is observed, and with a high consumption, a decrease in strength occurs. The maximum strength is achieved with the consumption of a bioPAV additive of 0.4%, and "Neopor" 0.6% of the cement weight, it increases by 5%. Some initial slowdown in cement hydration and hardening of cement stone is compensated already at the age of 1-3 days. The decrease in strength with a high content of foaming agent is due to a slowdown in cement hydration and a slowdown in the structure formation of cement stone. With a large consumption of foaming agent in the mixture, the content of low molecular weight substances reaches such an amount that the hydration of cement slows down significantly. The study shows that the degree of hydration of cement depends on the amount of surfactant. It was found that the concentration of the foaming additive mainly affects the quantitative phase composition of the cement stone. The qualitative composition of the hydrate phases remains constant regardless of the additive content. At elevated concentrations, surfactant molecules are adsorbed on the surface of the grains of the initial cement and the resulting hydrate phases, which is accompanied by a slowdown in cement hydration

Keywords: solidification, foaming agent, cement, hydration, foam concrete, cement solidification time, strength, structure

Kipicne. Көбіктің өміршеңдігін арттыруға әдетте ерітіндіге тұрақтандырғыш заттарды енгізу арқылы қол жеткізіледі. Тұздар құрамында көп валентті металл иондары, сұйық шыны, полиспирттер, полисахаралар, органикалық заттар және т.б олар қоюландырғыш ретінде әрекет етеді, ерітіндінің тұтқырлығын арттырады, пленкалардың қалыңдығын арттырады, көбіктен сұйықтың ағып кету процесін баяулатады (Магдеев & Гиндин, 1997).

Әдебиеттерге шолу. Көбік шөгінділерінің төмендеуі толтырғыштың құрамы мен құрылымына байланысты: ол кеуекті кеңістікті (жақтауды) қалыптастыру үшін қажетті материал ретінде қызмет етеді. Жоғары дисперсті толтырғыштың диффузия жылдамдығы төмен, ал гидрат қабықшалары цемент бөлшектерінің бір-біріне жабысып, салмағын тежейді (Сахаров, 1997).

Орташа тығыздықтан басқа, көбік бетонының беріктігіне толтырғыш массасының тұтқыр массаға қатынасы, сондай-ақ оңтайлы С/Т қатынасы және ББЗ ерітіндісінің концентрациясы үлкен әсер ететіні белгілі. Максимальды беріктікке толтырғыштың тұтқырға белгілі бір қатынасы болған кезде ғана қол жеткізіледі. Бұйымдарды қалыптау және ұялы бетонның кеуекті құрылымын қалыптастыру шарттарынан қоспаның оңтайлы мәні оның беріктігі мен аязға төзімділігінің ең жоғары мәндеріне сәйкес келеді, бұл макро кеуекті құрылымы жақсы материалды алуға байланысты болады (Хархардин & Веснин, 1999).

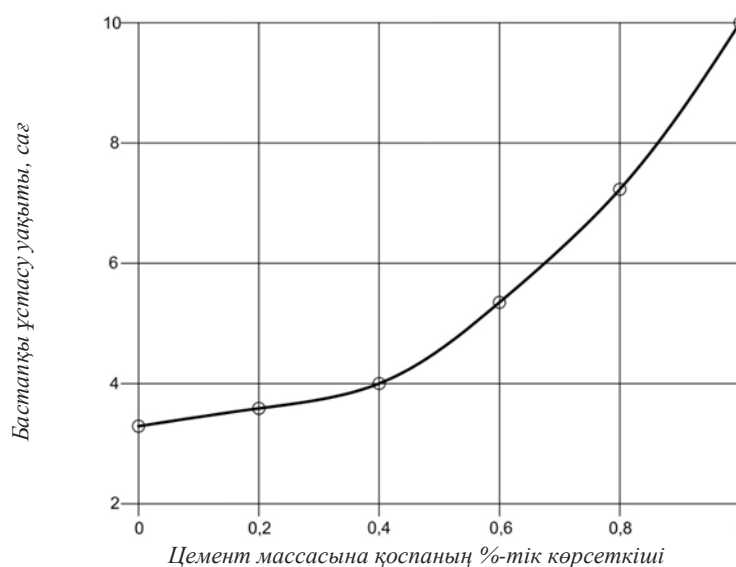
Портландцементпен карбонатты тау жыныстарының қоспалары негізінде қатайтатын құрылымдардың пайда болуының қазіргі заманғы идеясы кальций карбонаттарының қатысуымен C_3S және C_2S гидратациясында $6CaO \cdot SiO_2 \cdot CaCO_3 \cdot nH_2O$ скаутитінің маңызды емес мөлшері түзілетіндігін көрсетеді (Коротышевский, 1999). Бос әк болған кезде кальцийдің негізгі карбонаттарының түзілуі мүмкін, олардың беріктігін қалыптастырудағы рөлі толық анықталмаған (Граник, 1997). Құрамында алюминий бар клинкер минералдары – C_3A , C_4AF - $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$ текше кальций гидроалюминаты түзіледі. Гидрокарбоалюминаттар бір-бірімен және карбонатты толтырғыштардың бетімен тығыз кристалды конгломератқа біріктіріледі (Цыремпилов және т.б., 1997).

Беріктік жиынтығының кинетикасы цемент байланыстырғыштың ылғалдану жылдамдығымен анықталады. Пластикалық беріктіктің жеделдетілген жиынтығы көбік бетон массасының стратификация дәрежесін азайтуға және өнімнің бүкіл көлемінде жасушалық құрылымды сақтауға мүмкіндік береді (Монтаев және т.б., 2016).

Жұқа ұнтақталған дисперсті толтырғыш және көбік түзетін ерітіндінің шығыны тұтқыр заттың ғана емес, көбік бетонның да қасиеттерін айтарлықтай өзгертеді. Тұтқыр затты толтыру дәрежесінің жоғарылауымен оның су қажеттілігі артады. Тұтқыр қамырдың қалыпты тығыздығы, зерттеулер көрсеткендей, 27-31 % (портландцементтің қалыпты тығыздығы деңгейінде), толтырғыштың мөлшері 25-45% аралығында өзгерді.

Осылайша, тұтқыр заттың карбонатты толтырғышпен қалыпты тығыздыққа сәйкес келетін судың қатты қатынасын өзгерту функциясы сызықтыққа жақын, ал көбік түзгіш пластификациялаушы әсерге ие (Меркин, 1994). Бұл туралы, көбіктендіргіштің шығыны кезінде цемент массасының 0,6 % НГЦ 0,24-тен 0,21-ге дейін өзгереді (НГЦ=0,24 осы портландцемент үшін төлқұжат бойынша).

Материалдар және зерттеу әдістері. Беттік белсенді заттар тұтқыр заттың қатаю уақытына да айтарлықтай әсер етеді (Гладков, 1999). Осыған байланысты көбік түзгіштің цементті орнату уақытына әсері бойынша зерттеулер жүргізілді. 1-суреттен цемент массасынан көбік түзгіштің шығыны 0,4 %-ға дейін орнату уақытының өзгеруіне аздап әсер ететінін көруге болады (Черных және т.б., 1998). Жалпы, беттік белсенді заттар бастапқы кезеңде кристалдану орталықтарының дамуына және бірігуіне жол бермейді, сонымен қатар тұтқыр заттың еру жылдамдығын төмендетеді, бұл құрылымдардың беріктігінің дамуын кешіктіреді (Гарнашевич және т.б., 1998). Белгілі германдық «Неопор» көбіктендіргіші сияқты, био ББЗ цемент қамырының құрылымын қалыптастыруға тежегіш әсер етеді (Соловьева, 2007).



1-сурет. БиоББЗ санының цемент орнатудың басталу уақытына әсері

Ескерту – авторлар негізінде құрастырған (Соловьева, 2007)

t_1 басталу және t_2 аяқталу уақыты оның компоненттерінің (X_1) қатынасына және көбік түзетін ерітіндінің (X_2) шығынына байланысты тұтқыр заттың орнатылуы және өрнектен анықталуы мүмкін:

$$t_1 = 6,95 + 0,90 X_1 + 1,28 X_2 - 0,28 X_1 X_2 \quad (1)$$

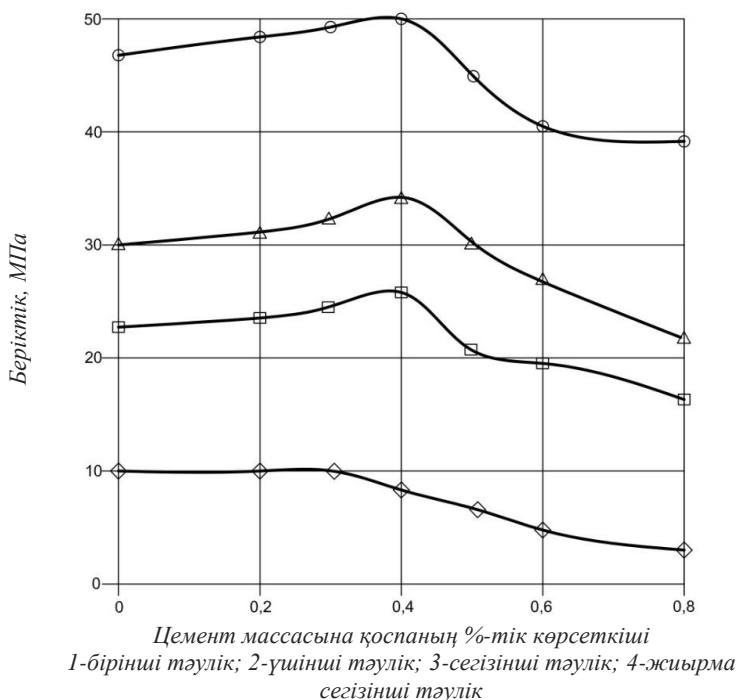
$$t_2 = 7,94 + 0,94 X_1 + 1,69 X_2 - 0,16 X_1 X_2$$

мұндағы: t_1 – басталу уақыты; t_2 – аяқталу уақыты; X_1 – компоненттер қатынасы; X_2 – көбік түзетін ерітінді шығыны.

Алынған деректерді талдау қалыпты тығыздық сынағына сәйкес келетін В/Т қатынасында компоненттердің қатынасы мен көбік түзетін ерітіндінің ағыны мен орнату уақытының басы мен соңы арасында байланыс бар екенін көрсетеді (Меркин, 1994). Орнату уақытын қысқарту үшін зерттелетін факторлардың мәндерін азайту керек. Бұған X_1 және X_2 алдындағы (+) белгілер дәлел бола алады. Коэффициенттердің шамаларын салыстыра отырып, көбік түзетін ерітіндінің концентрациясы тұтқыр заттағы

толтырғыштың пайызына қарағанда орнату уақытына көбірек әсер ететінін байқауға болады. Зерттелетін мәндер саласындағы факторлардың жұптық үйлесімі оның шамалы екенін және орнату уақытын қысқартуға ықпал етпейтінін көрсетеді (Mugahed Amran және т.б., 1998; Ахметов, 1992).

Цемент тасының беріктік параметрі байланыстырушы ББЗ ерітіндімен улану мөлшерін анықтауға мүмкіндік береді. ББЗ заттардың тұтқыр затқа әсер етуінің нәтижесі қоспасыз үлгіге қатысты қысу беріктігінің өзгеруі болып саналуы керек (Ахундов, 1998). Беріктікті анықтау қалыпты-ылғалдылық жағдайында 1, 3, 7, 28 күндік қатаюдан кейін жүргізілді (қалыпты-ылғалдылық жағдайы). Ақуызды көбіктендіргіштің цемент тасының беріктігіне әсерін зерттеу С/Ц өзгеріссіз жүргізілді. Цемент тасының беріктік қасиеттеріне көбік түзгіштердің әсерін салыстырмалы бағалау үшін әйгілі германдық «Неопор» көбік түзгішінің әсері зерттелді. Сығымдау күшінің өзгеруінің енгізілген қоспаның мөлшеріне тәуелділігі 1-кестеде және 2-суретте көрсетілген.



2-сурет. Цемент тасының беріктігінің биоББЗ санына және қатаю уақытына тәуелділігі
Ескерту – авторлар негізінде құрастырған (Шинтемиров Рыскалиев, 2015)

1-кесте. Цемент тасты сығымдау кезінде ББЗ заттар санының беріктікке әсері

Қоспа мөлшері, цемент массасының %	Қысу күші, МПа							
	«Биопор»				«Неопор»			
	1 күн	3 күн	7 күн	28 күн	1 күн	3 күн	7 күн	28 күн
0	10,1	25,1	31,6	47,8	10,1	25,1	31,6	47,8
0,2	10,3	24,7	32,0	48,7	9,6	24,7	31,6	47,8
0,4	8,3	27,3	34,5	50,0	9,0	26,2	33,2	48,2
0,6	6,2	19,2	26,0	41,0	8,5	29,2	35,7	48,8
0,8	1,5	16,2	22,6	37,3	5,6	20,9	27,4	40,5

Ескерту – авторлар құрастырған

Нәтижелері және оларды талқылау. 2-суреттегі қисықтарды талдау көрсеткендей, көбіктендіргіштің аз шығыны цемент тасының беріктігінің жоғарылауын көрсетеді, ал үлкен ағынмен беріктіктің төмендеуі байқалады. Максималды беріктікке биоББЗ қоспасын тұтыну кезінде 0,4 %, ал «Неопор» цемент массасының 0,6 % жетеді, ол 5 %-ға өседі. Цемент гидратациясының кейбір бастапқы баяулауы және цемент тасының қатаюуы 1-3 тәулік жасында өтеледі.

Көбік түзгіштің жоғары құрамындағы беріктіктің төмендеуі цементтің ылғалдануының баяулауына және цемент тасының құрылымының баяулауына байланысты. Қоспадағы көбіктендіргіштің көп тұтынылуымен төмен молекулалық заттардың мөлшері цементтің ылғалдануы айтарлықтай баяулайтын мөлшерге жетеді.

Қосымша ауа тарту күштің төмендеуіне де ықпал етеді. Егер қоспаның аз мөлшерімен цемент тасының кеуектілігінің жоғарылауы беріктікке айтарлықтай әсер етпесе, онда оңтайлы мөлшерден жоғары дозада тартылған ауаның жоғарылауы цемент тасының беріктігінің төмендеуіне әсер ететін қосымша фактор болып табылады.

Компоненттердің өзара әрекеттесу өнімдерін талдау және қатаю құрылымдарын қалыптастырудағы биоББЗ әсерінің рөлін анықтау үшін № 1, 2, 3 құрамдардың таблетка үлгілеріне рентгенофазалық талдау жүргізілді (2-кесте). ДРОН-2 дифрактометрінде иондаушы рентгенограммалар алынды.

2-кесте. Үлгілердің құрамы

№	Композиция құрамы, массасы бойынша %	С/Ц	Қоспа мөлшері, цемент массасының %	Қатаю шарттары
1	Цемент М500 (100 %)	0,3	0	қалыпты-ылғалдылық жағдайы
2	Цемент М500 (100 %)	0,3	0,3	қалыпты-ылғалдылық жағдайы
3	Цемент М500 (100 %)	0,3	1,0	қалыпты-ылғалдылық жағдайы

Ескерту – авторлар құрастырған

Цемент тасының № 1 үлгісінің рентгенограммасында қалыпты-ылғалдылық жағдайы 28 тәуліктен астам уақыт бойы қатайған, жазықтықаралық арақашықтықтары 3,04; 2,82; 1,88 Å болатын үш дифракциялық максимум тек кальций гидросиликаттарына жатқызылған. $d = 1,76$ Å сызығы сумен әрекеттеспеген алит C_3S дәндері туралы ақпаратты тасымалдайды. 2,63 Å шыңы гидратталған цементте кальций оксиді гидратының $Ca(OH)_2$ аз мөлшерінің болуын көрсетеді. $d = (2,77; 2,74; 2,59)$ Å бар дифракциялық сызықтар түзілген кальций гидросиликаттары сияқты алитке жатады. Қалған дифракциялық максимумдар $CaCO_3$ береді, бірақ кальций гидраттарының максимумдары да қолданылады.

Бірдей жағдайда жасалған № 1, 2 және 3 үлгілердің рентгенограммаларын салыстыру № 1 және 2 үлгілердің дифракциялық максимумдарының қарқындылығы іс жүзінде бірдей екенін көрсетеді. Ал № 3 үлгіде № 1-мен салыстырғанда 3,04 Å жазықтық аралықтарындағы дифракциялық сызықтардың қарқындылығы күрт төмендеді, ал 2,82 және 1,87 Å жазықтық аралықтарындағы екі сызық мүлдем жоғалып кетті (олар кальций гидросиликатының фазасына жауап береді). 2,77 Å планетааралық қашықтықтан дифракциялық сызықтардың қарқындылығы, керісінше, өсті. Сондай-ақ, Å 2,59 және Å 1,26 желілерінің қарқындылығы күрт өсті, бұл цемент тасында реакциясы жоқ алиттің болуын көрсетеді. Осы үлгінің рентгенограммасында 1,98 Å планетааралық қашықтығы бар жаңа шың пайда болды. Алита цемент тасындағы сандық анықтау үшін $d = 1,76$ линия сызығы ең қолайлы. № 1 үлгідегі ылғалдану реакциясына алиттің шамамен 80 %, ал № 3 үлгіде шамамен 65 % кірді. Осы жұмыстардан (Ramamurthy және т.б., 2016) 28 күннен кейін алиттің 83 % гидратация реакциясына түсетіні белгілі.

Жоғарыда айтылғандардан гидратация реакциясы көптеген қоспалармен айтарлықтай баяулайды, өйткені кальций гидросиликаттарынан алынған сызықтардың қарқындылығы төмендеді, ал кейбіреулері жоғалып кетті және алит фазасына жатқызылған сызықтардың қарқындылығы артты. Бұл $\text{Ca}(\text{OH})_2$ фазаларының саны өзгеріссіз қалғанын көрсетеді, өйткені бұл сызықтардың қарқындылығына қосымша әсер етпеді. Осылайша, ол цементтің ылғалдануын бәсеңдетіп қана қоймайды, сонымен қатар ылғалдану реакциясын біршама басқаша өткізеді, яғни гель түзілуінен емес, басқа кальций гидросиликаттарының түзілуінен, олар жазықтық аралық қашықтығы $1,98 \text{ \AA}$ болатын шыңның пайда болуына жатады. Мұны $2,77$ және $2,74 \text{ \AA}$ шыңдары арасындағы қарқындылықтың қайта бөлінуі де көрсетеді, өйткені № 1 бақылау үлгісіндегі максимум $2,77 \text{ \AA}$ интенсив қарқындылығы максимум $2,74 \text{ \AA}$ үлгісінен үлкен, ал № 3 үлгінің рентгенограммасында керісінше.

Рентгендік фазалық талдау деректері қоспаның мөлшері неғұрлым көп болса, цементтің силикат компоненттерінің ылғалдану жылдамдығы және неоплазмалардың (тоберморит гелі, кальций гидроксиді) түзілу қарқындылығы соғұрлым аз болатынын көрсетеді. Егер цемент тастағы силикат фазалары беріктіктің негізгі тасымалдаушылары болып табылатындығын ескеретін болсақ, онда осы ББЗ затты қолданған кезде ерітінді қоспасындағы үлкен дозалардан аулақ болу керек (Shintemirov және т.б., 2016; Mugahed, 2012). Тұтқыр массаның $0,1-0,4 \%$ ББЗ заттарды енгізу қоспасыз құраммен салыстырғанда неоплазмалар құрылымында айтарлықтай өзгерістерге әкелмейтінін атап өткен жөн.

БиоББЗ-тың цемент жүйесінде неоплазмалардың пайда болуына әсерін неғұрлым толық зерттеу мақсатында қатаюдың ерте кезеңдерінде – 1, 3, 7, 28 тәулікте цемент массасынан әртүрлі ББЗ заттардың құрамы бар ерітінді үлгілерін рентгенофазалық талдау деректері алынды және талданды (3-кесте).

3-кесте. Үлгілердің құрамы

№	Құрамы, салмағы бойынша %	С/Ц	Қоспаның мөлшері, цемент салмағы бойынша %	Кептіру шарттары
1	Цемент М500 (70 %) + мел (30 %)	0,3	0	қалыпты-ылғалдылық жағдайы
2	Цемент М500 (70 %) + мел (30 %)	0,3	0,4	қалыпты-ылғалдылық жағдайы
3	Цемент М500 (70 %) + мел (30 %)	0,3	0,8	қалыпты-ылғалдылық жағдайы

Ескерту – авторлар құрастырған

Бастапқы күйдегі байланыстырғыш ұнтақ қоспасының рентгендік дифракциялық суретінде ең айқын дифракциялық сызықтар CaCO_3 борына сәйкес келеді (ASTM стандарты бойынша $d = 3,035; 2,495; 2,285; 2,095; 1,9013; 1,67; 1,670$); алит – Ca_2SiO_5 ($3,04; 2,736; 2,590; 1,761 \text{ \AA}$). Сонымен қатар, ASTM файлында Са негізіндегі қосылыс туралы деректер бар. Негізгі дифракциялық сызықтардың орны белит сызықтарымен жақсы сәйкес келеді – $\beta\text{-2CaOSiO}_2$ ($d = 3,046; 2,744; 2,608; 2,282 \text{ \AA}$).

№ 1 үлгідегі қалыпты қатаюдың 1-ші күні бор құрылымына сәйкес келетін дифракциялық сызықтардың қарқындылығы іс жүзінде өзгеріссіз қалды, сондықтан бордың кристалдық торының құрылымында айтарлықтай өзгерістер болмайды, яғни бор іс жүзінде химиялық реакцияға қатыспайды. Бұл жағдайда барлық фазалардың дифракциялық сызықтары кішірек бұрыштарға қарай жылжиды, бұл жазықаралық қашықтықтардың ұлғаюын көрсетеді. Осылайша, біз қазірдің өзінде 1-ші күні бор жасушаларының параметрлері тор түрінде айтарлықтай өзгеріссіз өседі деп қорытынды жасай аламыз. Цемент клинкерінің минералдарының құрылымында елеулі өзгерістер орын алады, бұл

брагг бұрышы (θ) аймағындағы дублеттің және 24,25 бұрыштағы дифракция сызығының жоғалуы, сондай-ақ күрт төмендеуі (шамамен 4 есе).

№ 2 үлгіде 1-ші күні рентгендік дифракциялық суреттің барлық дерлік сызықтарының қарқындылығы мен жағдайы, біреуін қоспағанда, № 1 үлгі сызықтарының қарқындылығы мен орналасуына сәйкес келеді. Сонымен қатар № 2 үлгі үшін цемент құрылымына сәйкес келетін сызықтың қарқындылығы (бұрыш $18,4^\circ$) № 1 үлгіге қарағанда айтарлықтай аз, бұл сәйкес цемент фазасының еруінің үдеуін көрсетуі мүмкін, ол нақтылау мүмкін емес.

Қатығудың 1-ші күніндегі № 1 және № 3 үлгілердің рентгендік дифракция заңдылықтарын салыстыру брагг бұрышының 19° аймағында № 1 үлгіде бірінші дублет сызығының жоқ екенін көрсетеді, ал оның № 3 үлгідегі қарқындылығы $0,351 \cdot I_{\max}$; $\theta = 20,1^\circ$ сызықтың қарқындылығы концентрацияның жоғарылауымен төмендейді және 24° бұрышта жаңа фазаның басқа сызығы пайда болады. Бұл реакция жылдамдығының өзгеруін, яғни қоспа концентрациясының жоғарылауымен цемент клинкерінің негізгі құрылымдық компонентінің еруінің баяулауын көрсетуі мүмкін.

7-ші күні № 1 үлгінің рентгендік дифракциялық суретінде кристалдық тордың көлемі ұлғаюын жалғастырады (сызықтар орнында кішірек бұрыштарға қарай шамалы қосымша ығысу байқалады). Бұл ретте құрылым жақсарады немесе цемент фазасының мөлшері артады, бұл цемент құрылымдарының дифракциялық сызықтарының қарқындылығының жоғарылауымен дәлелденеді ($d - 3,044$). Бор құрылымы сызықтарының салыстырмалы қарқындылығының өзгеруі байқалады, бұл оның құрылымындағы өзгерістерді көрсетеді. Қаттыданудың 7-ші күніндегі қоспасы бар және қоспасыз цемент тасының рентгендік сызбаларын салыстыру № 2 үлгідегі рентгендік суреттің барлық сызықтары тығыздалуды (нығыздауды) көрсететін үлкен брагг бұрыштарына сәл ығысатынын көрсетеді. Кристалдық жасушалар құрылымының, сәйкес құрылымның тығыздығының жоғарылауы № 2 үлгі үшін $17,1^\circ$ бұрыштағы сызықтың интенсивтілігі № 1 үлгіге қарағанда үлкен, ал № 3 үлгі үшін ол айтарлықтай аз. Бұл негізгі фаза көлеміндегі сәйкес өзгерістерді көрсетуі мүмкін.

Қорытынды. 28-ші күні № 1 және № 2 үлгілердің алынған рентгендік үлгілері іс жүзінде бірдей. № 3 және № 1 үлгілер үшін дифракциялық сызықтардың орны мен қарқындылығы бірдей, $17,1^\circ$ бұрыштағы біреуін қоспағанда, № 3 үлгі үшін қарқындылығы № 1 үлгіге қарағанда 20 % аз.

Рентгендік фазалық талдау цементтің гидратация дәрежесі беттік белсенді заттың мөлшеріне байланысты екенін көрсетеді. Көбік түзетін қоспаның концентрациясы ең алдымен цемент тасының сандық фазалық құрамына әсер ететіні анықталды. Гидрат фазаларының сапалық құрамы қоспаның құрамына қарамастан тұрақты болып қалады. Жоғары концентрацияларда ББЗ молекулалары бастапқы цементтің түйіршіктерінің бетінде және одан пайда болған гидрат фазаларында адсорбцияланады, бұл цемент гидратациясының баяулауымен бірге жүреді.

Мүдделер қақтығысы. Авторлар мүдделер қақтығысының жоқтығын мәлімдейді.

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

Әдебиеттер тізімі

- Магдеев У.Х., Гиндин М.И. (1997). Ресурсосберегающая технология ячеистого бетона // Новое в строительном материаловедении: Юбилейный сборник кафедры «Строительные материалы и технологии». – М.: МГУПС. – С. 58-59.
- Сахаров Г.П. (1997). Эффективные материалы с повышенными теплозащитными и строительно-эксплуатационными свойствами // Новое в строительном материаловедении: Юбилейный сборник кафедры «Строительные материалы и технологии». – М.: МГУПС. – С. 74.

- Хархардин А.И., Веснин Л.С. (1999). Опыт освоения массового производства пенобетонных изделий // Строительные материалы. – № 2. – С. 30-31.
- Коротышевский О.В. (1999). Новая ресурсосберегающая технология по производству высокоэффективных пенобетонов // Строительные материалы. – 1999. – № 2. – С. 32-33.
- Граник Ю.Г. (1997). Теплоэффективные ограждающие конструкции жилых и гражданских зданий // Строительные материалы. - №2. – С.4-6.
- Цыремпилов А.Д., Беппле Р.Р., Заяханов М.Е. и др. (1999). Пенобетон на основе перлитоиизвестково-гипсового вяжущего // Строительные материалы. – № 4. – С. 30.
- Монтаев С.А., Мизюряев С.А., Рыскалиев М.Ж., Изгалиев Е.Д. (2016). Исследование влияние пенобетона с химическими добавками // Научный журнал. Вестник Жезказганского университета имени О.А. Байконурова. – Жезказган, - №1(31). – С. 402-408.
- Меркин А.П. (1994). Ячеистые бетоны: научные и практические предпосылки дальнейшего развития // Строительные материалы. - №4.
- Гладков Д.И., Сулейманова Л.А., Калашников А.В. (1999). Новая технология ячеистобетонных изделий // Строительные материалы. - № 7-8. – С. 26-27.
- Черных В.Ф., Ницун В.И., Маштаков А.Ф. и др. (1998). Технологическая линия по производству пенобетонных изделий неавтоклавного твердения // Строительные материалы. - №12. – С.4-5.
- Гарнашевич Г.С., Гончарик В.Н. (2002). О теплофизических свойствах ячеистобетонных изделий // Строительные материалы и изделия. – Киев, - № 3. – С. 24-25.
- Соловьева В.Я. (2007). Особенности получения пенобетона улучшенного качества // Материалы международной научно-практической конференции «Пенобетон-2007». – Спб., – С. 7 – 9.
- Меркин А.П. (1994). Ячеистые бетоны: научные и практические предпосылки дальнейшего развития // Строительные материалы. - №4.
- 14 Mugahed Amran Y.H., Abang Ali A.A., Raizal S.M., Rashid et al. (2012). Structural behavior of axially loaded precast foamed concrete sandwich panels // Construction and Building Materials. – Vol. 107. – P. 307-320.
- Ахметов А.Р. (1992). Технология и свойства ячеистого бетона: учебное пособие // Респуб. издат. кабинет по учебной и методической литературе Министерства народного образования Республики Казахстан. – Алма-Ата. – 212 с.
- Ахундов А.А. (1998). Развитие индивидуального жилищного строительства как рычаг подъема экономики страны // Строительные материалы. – № 4. – С. 27-28.
- Сычева А.М., Попова Е.А., Дробышев Д.И., Филатов И.П. (2007). Активированное твердение пенобетонов / под ред. д.т.н. Л.Б. Сватовской. – Спб.: ПГУПС. – 62 с.
- Шинтемиров К.С., Рыскалиев М.Ж. (2015). Повышение активности цемента и песка для приготовления пенобетона естественного твердения / Сборник трудов международной конференции // Наука и Образование: проблемы развития строительной отрасли». – Саратов, – С. 36-47.
- Ramamurthy K., Nambiar E.K. Kunhanandan Ranjani G. (2016). A classification of studies on properties of foam concrete, Building Technology and Construction Management Division, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Madras, Chennai 600036 // India, Indu Siva Cement & Concrete Composites. – Vol. 31. – Issue 6. – P. 388-396.
- Shintemirov K.S., Montaev S.A., Ryskaliyev M.Zh., Bakushev A.A., Narikov K.A. (2016). Investigation into the Properties of Foamed Concrete Modified by Chemical Additives // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences (RJPBCS). – India, 2016. – № 7(3). – P. 2065-2072.
- Mugahed Amran Y.H., Abang Ali A.A., Raizal S.M., Rashid et al. (2012). Structural behavior of axially loaded precast foamed concrete sandwich panels // Construction and Building Materials. – Vol. 107. – P. 307-320.

Information about authors

Ryskaliyev Muratbay Zhanaidarovich – PhD, Zhangir Khan West Kazakhstan Khan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan, muratbai_84@mail.ru ORCID: 0000-0002-3361-2076

Zharylgapov Sabit Muratovich – PhD, Zhangir Khan West Kazakhstan Khan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan, Sabit.raisa@mail.ru ORCID: 0000-0002-3104-6568

Mazhitov Yerkebulan Bisengalievich – Ph.D., Zhangir Khan West Kazakhstan Khan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan, mazhitov201090@gmail.com ORCID: 0000-0001-6155-4865

Kydyrashev adilzhan Bekezhonovich – PhD, Zhangir Khan West Kazakhstan Khan Agrarian Technical University, Uralsk, Kazakhstan, a.kydrashov@mail.ru ORCID: 0000-0002-1404-1589

ҚҰРЫЛЫС. СӘУЛЕТ
СТРОИТЕЛЬСТВО. АРХИТЕКТУРА
CONSTRUCTION. ARCHITECTURE

DOI 10.51885/1561-4212_2025_1_332
MPHTI 67.23.13

В.В. Яскевич

Satbayev University, г. Алматы, Казахстан

E-mail: v.yaskevich@satbayev.university*

**ПРИМЕНЕНИЕ BIM ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ИНФРАСТРУКТУРОЙ ЗДАНИЙ
В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ: ОПЫТ SATBAYEV UNIVERSITY**

**ШЕКТЕУЛІ РЕСУРС ЖАҒДАЙЫНДА ИНФРАҚҰРЫЛЫМ
БАСҚАРУЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫСЫ ҮШІН BIM ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН ҚОЛДАНУ:
СӘТБАЕВ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ ТӘЖІРИБЕСІ**

**APPLICATION OF BIM TECHNOLOGIES FOR BUILDING
INFRASTRUCTURE MANAGEMENT IN RESOURCE-CONSTRAINED CONDITIONS:
THE EXPERIENCE OF SATBAYEV UNIVERSITY**

Аннотация: Статья посвящена исследованию возможностей использования технологий информационного моделирования зданий (BIM) в условиях ограниченных ресурсов. Рассматривается опыт внедрения BIM в управление инфраструктурой одного из корпусов Satbayev University. Основной целью исследования было изучение преимуществ и ограничений BIM при моделировании существующих объектов, а также выявление оптимальных уровней детализации для различных задач. Особое внимание уделено методам снижения затрат на программное обеспечение и оптимизации процессов моделирования. Результаты исследования могут быть полезны для организаций, заинтересованных во внедрении BIM технологий при ограниченных бюджетах.

Ключевые слова: BIM, информационное моделирование зданий, Satbayev University, управление инфраструктурой, ограниченные ресурсы, уровни детализации, оптимизация затрат, Revit, Microsoft Teams, Navisworks.

Аңдатпа Мақала ғимараттарды ақпараттық модельдеу технологияларын (BIM) шектеулі ресурстар жағдайында қолдану мүмкіндіктерін зерттеуге арналған. Satbayev University-дің бір корпусының инфрақұрылымын басқаруда BIM-ді енгізу тәжірибесі қарастырылады. Зерттеудің негізгі мақсаты – қолданыстағы объектілерді модельдеу кезінде BIM-нің артықшылықтары мен шектеулерін зерттеу, сондай-ақ әртүрлі тапсырмалар үшін оңтайлы деңгейлерін анықтау болды. Ерекше назар бағдарламалық қамтамасыз ету шығындарын азайту және модельдеу процестерін оңтайландыру әдістеріне аударылады. Зерттеу нәтижелері шектеулі бюджетпен BIM технологияларын енгізуге мүдделі ұйымдар үшін пайдалы болуы мүмкін.

Түйін сөздер: BIM, ғимараттарды ақпараттық модельдеу, Satbayev University, инфрақұрылымды басқару, шектеулі ресурстар, деңгейлерді детализациялау, шығындарды оңтайландыру, Revit, Microsoft Teams, Navisworks.

Abstract: The article is devoted to the study of the possibilities of using building information modeling (BIM) technologies in conditions of limited resources. The experience of implementing BIM in infrastructure management of one of the buildings of Satbayev University is considered. The main objective of the study was to study the advantages and limitations of BIM in modeling existing objects, as well as identifying optimal levels of detail for various tasks. Particular attention is paid to methods for reducing software costs and optimizing modeling processes. The results of the study can be useful for organizations interested in implementing BIM technologies with limited budgets.

Keywords: BIM, building information modeling, Satbayev University, infrastructure management, limited resources, levels of detail, cost optimization, Revit, Microsoft Teams, Navisworks.

Введение. В последние десятилетия цифровые технологии получили широкое распространение в архитектурно-строительной отрасли. Одной из наиболее эффективных можно

считать информационное моделирование зданий (Building Information Modeling, BIM). BIM позволяет интегрировать все аспекты проектирования, строительства и эксплуатации зданий в единую цифровую модель, что значительно повышает эффективность работы, снижает затраты и улучшает качество конечного продукта. В условиях растущей урбанизации и ужесточающихся требований к устойчивому развитию BIM технологии становятся неотъемлемым инструментом для архитекторов, инженеров и управляющих объектами.

Многочисленные исследования показывают, что применение BIM технологий способствует достижению различных аспектов устойчивости зданий. Например, использование датчиков, сенсоров и систем «умного» управления позволяет существенно повысить энергоэффективность и безопасность объектов, оптимизировать эксплуатационные расходы (Wong & Zhou, 2015). Тем не менее, несмотря на очевидные преимущества, внедрение BIM сопряжено с рядом трудностей, главным образом связанных с высокой ресурсоемкостью процесса моделирования и необходимостью значительных инвестиций в программное и аппаратное обеспечение и обучение персонала (Sriyolja et al., 2021).

Отдельно можно выделить область внедрения цифровых технологий в эксплуатацию существующих объектов, где BIM также играет существенную роль (Wong et al., 2018). В то же время исследователи отмечают особые трудности во внедрении BIM именно на этапе эксплуатации объекта (Volk et al., 2014).

Особенно остро эта проблема стоит для организаций, занимающихся эксплуатацией уже существующих зданий, таких как университеты, больницы и государственные учреждения. Как правило, такие организации не располагают достаточными фондами для закупки дополнительного оборудования и оплаты дорогостоящих услуг специалистов, что значительно ограничивает их возможности по внедрению BIM технологий (Kassem et al., 2015). В связи с этим возникает вопрос: какие преимущества информационного моделирования могут быть доступны широкому кругу пользователей и как можно их достичь в условиях ограниченных ресурсов?

Новизна данного исследования заключается в разработке и внедрении оптимизированного подхода к использованию BIM технологий в условиях ограниченных ресурсов. В отличие от традиционных методов, требующих значительных финансовых и временных затрат, предложенный подход фокусируется на использовании простых методов, доступного программного обеспечения и минимально необходимого уровня детализации модели (LOD) для эффективного управления инфраструктурой существующих зданий. Исследование демонстрирует практическое применение данного подхода на примере одного из корпусов Satbayev University, что позволяет получить ценные данные о возможностях и ограничениях BIM при минимальных ресурсах. Это открывает новые перспективы для широкого круга пользователей, особенно для образовательных и государственных учреждений, испытывающих ограничения в бюджете.

Авторы уже публиковали опыт по моделированию другого корпуса, где были выявлены сложности с организацией среды общих данных и внедрением стандартов и регламентов (Yaskevich et al., 2022), и настоящее исследование является продолжением данной работы. Основной задачей было оптимизировать процессы управления инфраструктурой университета, учитывая такие проблемы, как отсутствие необходимой проектной документации, разрозненность неграфической информации и сложности в управлении данными о здании.

Конечная цель проекта включает моделирование архитектурного раздела, инженерных сетей и оборудования, а также формирование платформы для использования и управления полученными моделями. Особое внимание уделялось оптимизации уровня графической детализации модели (LOD) для различных задач эксплуатации здания, что позволило существенно снизить трудозатраты и повысить эффективность использования

модели. В данной статье отражены итоги первого этапа, направленного на выполнение архитектурно-строительной части.

Результаты исследования показали, что при рациональном подходе к уровню детализации и использованию доступного программного обеспечения_ информационное моделирование может стать эффективным инструментом для управления инфраструктурой даже при ограниченных ресурсах. Такой подход позволяет не только упростить и ускорить рутинные операции по получению, хранению и изменению информации, но и создать основу для дальнейшего внедрения более сложных и ресурсоемких технологий в будущем.

Основные задачи и принципы моделирования. Несмотря на то, что целью является оптимизировать усилия, в работе сохраняются основные принципы информационного моделирования, выработанные передовыми практиками, – использование регламентов и среды общих данных для корректной совместной работы, применение специализированного программного обеспечения, организация модели с целью дальнейшего использования и др. (Sacks et al., 2018) Упрощение моделей и процессов основано на ограничении функциональных задач наиболее часто применяемыми при ограничении точности и детализации модели требованиями этих задач.

Основанием для выполнения рассматриваемой работы стало задание руководства университета. Основной целью была оптимизация процессов управления инфраструктурой университета. При этом были выделены следующие проблемы: отсутствие необходимой проектной документации по зданиям университета, разрозненность неграфической информации и источников ее получения, сложности в управлении информацией о здании (например, внесение изменений в ходе ремонта, реконструкции). Для составления плана реализации информационного моделирования было запрошено техническое задание и проведена беседа с руководителем управления инфраструктурой университета, на основе чего была составлена табл. 1.

Таблица 1. Техническое задание по информационному моделированию от департамента управления инфраструктурой

№	Раздел	Запрошенная информация
1.	Архитектурно-строительный раздел	Размеры помещения (пол, потолок, стены, окна, дверь) Материал стен, потолков Цвет стен, потолков Материал окон (+специфические характеристики – цвет, открытие) Материал дверей Материал покрытия пола Материал плинтусов Наличие штор/жалюзи/ролл-штор Наличие и вид мебели, включая стулья, журнальные столики, диваны, кресла, ковры, холодильники, СВЧ-печи, сейфы и др.
2.	Электрические сети	Расположение, кол-во и вид (накладные/внутренние/напольные) розеток Наружная/внутренняя прокладка кабелей Кол-во и характеристики светильников Наличие, модель и год установки кондиционера(ов) Наличие электрических радиаторов Наличие 3-х фазного питания (схема, расположение розеток)
3.	Слаботочные сети	Расположение, кол-во и характеристики розеток Схема прокладки кабелей для интернета (кабелегон/гофра) Схема прокладки кабелей для телефонизации (кабелегон/гофра) Схема прокладки кабелей для пожарной сигнализации (кабелегон/гофра)

Окончание табл. 1

№	Раздел	Запрошенная информация
		Схема прокладки кабелей для охранной сигнализации (кабелегон/гофра) Схема прокладки кабелей для видеонаблюдения Характеристики телефонного аппарата
4.	Водоснабжение и канализация	Наличие умывальника/раковины (гор., хол. вода, канализация) Возможность монтажа коммуникаций Наличие пожарного гидранта
5.	Отопление и вентиляция	Наличие естественной вентиляции Наличие принудительной вентиляции Наличие зонтов в лабораторных помещениях Наличие и мощность вентиляторов Схема и расположение радиаторов Кол-во и вид радиаторов
<i>Примечание – составлено автором</i>		

Процесс было решено провести в несколько этапов: на первом этапе выполнить моделирование архитектурного раздела как основы, с которой далее смогут работать инженеры; на втором – моделирование необходимых инженерных сетей и оборудования; на третьем – формирование платформы для использования и управления полученными моделями. В данной статье отражены результаты первого этапа работы.

С точки зрения моделирования существующих объектов одним из основных вопросов является детализация графической и неграфической частей модели. Очевидно, что основные трудозатраты возникают именно при моделировании геометрии объектов, значит оптимизация может быть достигнута рациональным уровнем графической детализации. Для определения такого уровня необходимо составить перечень основных задач, возникающих в ходе эксплуатации здания, определить роль, которую информационная модель может играть при их выполнении, выделить необходимую для этого информацию, на основе чего можно определить необходимый уровень детализации LOD и уровень информации LOI (здесь целесообразно использовать именно такое значение данных терминов).

Таблица 2. Сопоставление задач и параметров информационной модели

№	Задачи, возникающие в ходе эксплуатации рассматриваемого здания	Задачи, требующие использования информационной модели	Необходимые сведения	Требуемые уровни детализации и информации
1.	Ремонт (восстановление существующих характеристик объекта)	Расчет объема работ и материалов	Общие габаритные характеристики – линейные размеры, количество, площади покрытий и др.	LOD 200 LOI 300
2.	Управление помещениями (расписание, доступ)	Определение функции помещения, его принадлежности и возможных сценариев использования	Данные о помещении, его расположении, примерных габаритах	LOD 100 LOI 300
3.	Инвентарный учет (мебель, оборудование)	Учет наличия, своевременная замена	Наименование и количество, характеристики, общие габариты, состояние	LOD 100 LOI 300

Окончание табл. 2

№	Задачи, возникающие в ходе эксплуатации рассматриваемого здания	Задачи, требующие использования информационной модели	Необходимые сведения	Требуемые уровни детализации и информации
4.	Обслуживание помещений (уборка, мелкие работы)	Определение графика и объема работ	Примерные габариты помещения и его расположение	LOD 100 LOI 300
5.	Инженерные расчеты (расчет водоснабжения, отопления, вентиляции)	Настройка инженерных систем здания	Примерные габариты помещения и материалы ограждающих конструкций	LOD 100 LOI 300
<i>Примечание – составлено автором</i>				

Как можно видеть из таблицы, практически все основные задачи решаются при минимальном уровне LOD 100-200. Создание такой модели требует значительно меньших ресурсов, чем LOD 300-400, которые обычно фигурируют при проектировании. Общая гипотеза состоит в том, что для каждой из задач при моделировании должен быть определен минимальный уровень детализации, при котором необходимые задачи выполняются. В отличие от 3D-моделирования, создание и обработка информации, привязанной к элементам модели, гораздо менее требовательны к ресурсам, поэтому высокие значения LOI приемлемы (Alavi & Forcada, 2019).

Вторым ресурсоемким направлением являются затраты на специализированное программное обеспечение, используемое для моделирования и работы с данными. Для исключения подобных расходов в проекте были использованы решения, которые для студентов и сотрудников университета являются бесплатными или условно бесплатными. Так, для моделирования использовалась учебная версия Revit 2024, для проверки и дальнейшего использования модели – Navisworks (Inojosa & de Araújo Vilanova, 2023). Среда общих данных (CDE) была сформирована на основе Microsoft Teams.

Процесс моделирования корпуса ГМК. Для выполнения работы была собрана команда из 10 студентов 4 курса, обучающихся по образовательной программе 6B07301 Архитектура в рамках дисциплины «Основы BIM технологий». Для моделирования был выбран один из старых корпусов университета – ГМК. Данный корпус представляет собой сложное переплетение различных внутренних департаментов старых и новых конструкций, что усложняет ведение любых работ. Общая площадь составляет более 15000 м². Для того чтобы студенты получили разносторонний опыт, объем работы был разделен между всеми участниками по этажам и частям здания. Условно были выделены центральная часть и два крыла – восточное и западное. Моделирование окружающей территории не проводилось.

Основные работы, которые были выполнены в рамках проекта:

- Формирование ВЕР
- Обмер здания.
- Моделирование необходимых семейств – дверей, окон, витражей
- Информационное моделирование здания

На первых этапах работы предполагалось разработать BIM стандарт Университета для использования во всех подобных работах. Однако эта мысль была пересмотрена ввиду большой трудоемкости процесса, отсутствия четкого представления о всех возможных сценариях использования информационного моделирования в Университете и недостатка опыта во взаимодействии между департаментами. В итоге было решено изучить и использовать передовой опыт MIT. Дальнейшая работа строилась на открытых шаблонах MIT Design Standards T03, T04 (MIT Facilities, n.d.), а также шаблонах и стандартах

Autodesk (Шаблоны Revit для Казахстана, n.d., 2019). Некоторые моменты, такие как списки параметров, требования к семействам и др., корректировались в соответствии с целью работы. В процессе определились базовые части стандартов, такие как правила наименования, хранения, использования, управления данными, которые в дальнейшем планируется использовать для формирования BIM стандартов Сатпаев Университета.

Основные требования по параметрам, прописанные в ВЕР, указаны в табл. 3.

Таблица 3. Основные требования к использованным семействам

№	Категории элементов	Необходимые параметры	Требования
1.	Помещения	Номер	Номер помещения, если таковой имеется
		Принадлежность (для идентификации)	Департамент, к которому оно относится
		Назначение	Для чего используется (аудитория, лаборатория, преподавательская и др.)
		Ответственное лицо	Сотрудник, ответственный за помещение
		Контакт ответственного лица	Контакт сотрудника
		Расписание	Табличный файл, синхронизированный с образовательным порталом
		Режим допуска	Ограничения по допуску
		Состояние	В каком состоянии находится
		Список оборудования	Табличный файл, составленный на основе инвентаризации
		Фотографии помещения	Общий вид помещения
		Отделка потолка	Материал (с производителем и индексом модели, если имеется)
		Отделка стен	
		Отделка пола	
		Тип плинтуса	
		Тип занавесей на окнах	
График обслуживания	Табличный файл с отметками об обслуживании		
План ремонтных работ	Табличный файл с отметками о проведенных и запланированных работах		
2.	Окна и двери	Ширина	Размер с точностью 10 см
		Высота	
		Год установки	Например: 2010
		Состояние	Состояние изделия
		Материал	Например: дерево
		Фотография	Актуальная фотография изделия
		Свойства аналитической модели	Теплотехнические и шумоизоляционные характеристики
3.	Ограждающие конструкции	Толщина	Размер с точностью 10 см
		Материал	Материал конструкции
		Свойства аналитической модели	Теплотехнические и шумоизоляционные характеристики

Примечание – составлено автором

Для формирования среды общих данных, кроме стандартных рекомендуемых программ Autodesk, BIM 360, BIM Collaborate Pro, в профессиональной среде достаточно

часто используются обычные облачные сервисы (Evans, n.d., 2022). Они менее эффективны с точки зрения удобной и надежной синхронизации, зато более универсальны, просты в обращении и относительно дешевы. Поскольку у SU имеется дописка на сервисы Microsoft для сотрудников и студентов, за основу было принято использование облачного сервиса OneDrive, не требующее дополнительных ресурсов.

Для организации совместного доступа ссылка на папку (BIM_Satbayev_University_GMK) в хранилище руководителя была выслана всем участникам проекта. После установки OneDrive и добавления ярлыка общей папки в директорию остальным участникам стало возможным синхронизировать данные в облачной среде. Ввиду того, что многопользовательская синхронизация через стандартные процедуры Autodesk Revit в данном случае оказалась не полностью стабильна (происходили ошибки), был выбран вариант совместной работы через «связи». Для этого каждому участнику был подготовлен свой шаблон, с настройками общих координат и параметров. Файл сборки был сформирован как общий файл с ограниченным доступом. Таким образом, каждый участник мог редактировать свою часть, не опасаясь потери данных. А руководитель мог проверять и координировать работу через общий файл (Solanki et al., 2024).

Обмеры здания проводились с помощью лазерных рулеток, по традиционной методике (Соколова, 2008). Учитывая необходимый уровень точности и детализации, помещения были приняты прямоугольными и замер проводился, как правило, по двум сторонам. Во избежание расхождения расположения основных несущих стен между этажами—были сняты осевые размеры, которые в дальнейшем использовались как приоритетные. Нюансные изменения уровня было решено игнорировать. Кроме обмера помещений, были определены размеры проемов, проведена фотофиксация.

Результаты и их обсуждение. В результате была сформирована единая модель горно-металлургического корпуса Satbayev University (рис. 1), содержащая информацию, необходимую для более эффективного решения задач по управлению инфраструктурой, как обозначенных в техническом задании, так и других, выявленных при анализе процессов эксплуатации. Работа была проведена группой студентов под руководством преподавателя кафедры «Архитектура» Яскевича В.В. в течение весеннего семестра 2024 года без привлечения каких-либо дополнительных ресурсов.

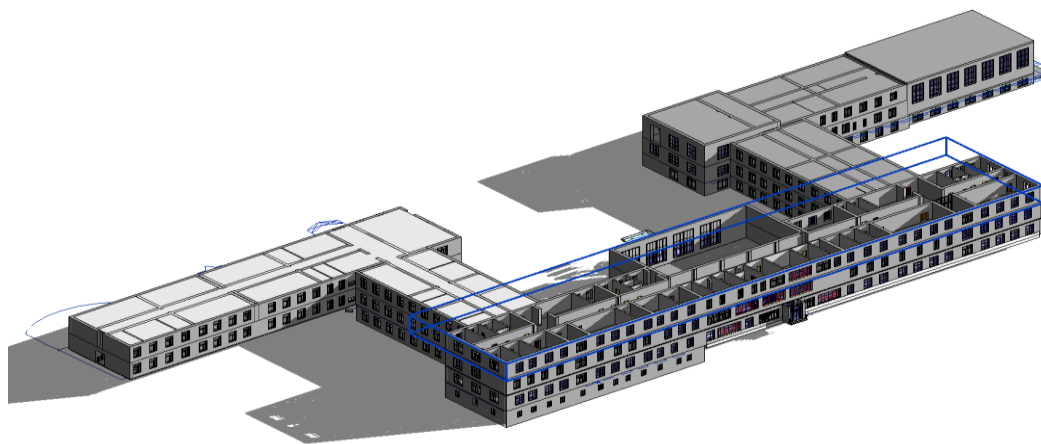


Рисунок 1. Общий вид модели

Примечание – составлено автором

По подходу к моделированию данную работу можно сравнить с моделью, выполненной для Туринского Университета (Meschini et al., 2022). Однако, ввиду того,

что в рассматриваемом случае, кроме административного управления, подразумевались еще и работы по материальному обслуживанию помещений, модель содержит больше деталей и информации, необходимой для ремонтных и других работ.

Модель выполнена в соответствии с существующими параметрами здания с точностью до 10 см, что дало, с одной стороны, возможность относительно быстро выполнить обмеры, с другой стороны, достаточно точную информацию для задач по управлению инфраструктурой. Однако даже с подобными допущениями именно обмерные работы заняли большую часть времени, то есть именно эти операции представляют наибольший потенциал для дальнейшей оптимизации моделирования. В этой связи большой интерес представляют исследования по 3D-сканированию и полуавтоматическому моделированию на основе облака точек (Jung et al., 2014) Такой подход требует специализированного оборудования, но позволяет существенно сократить трудозатраты.

Несмотря на то, что задачей было оптимизировать процесс, можно отметить, что излишне много времени занял процесс подготовки моделей семейств дверей и окон с учетом их конфигурации и материала (было создано более 50 типов окон и более 70 типов дверей). При аналогичных задачах возможно использовать модели с уровнем графической проработки LOD 100, а остальную информацию вводить в виде параметров. Это позволит сократить количество ресурсов и устранить лишние погрешности в модели.

По выполненной модели возможен вывод любых необходимых данных по запросу департамента управления инфраструктурой ППС или студентов в табличном формате (рис. 2) либо в формате схем зонирования (рис. 3) или иных визуально понятных диаграмм (рис. 4–5). Данные в таблице интерактивно отражают данные модели, т.е. при изменении в таблице данные в модели также меняются, что позволяет удобно управлять данными в процессе эксплуатации.

A	B	C	D	E	F
Номер	Назначение	Принадлежность	Ответственное лицо	Контакт ответств	Режим допуска
105	Помещение	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	По расписанию
103	Преподавательская	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	По расписанию
109	Учительская	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	По расписанию
	Коридор спорт.зала	Департамент управления ин	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	Свободный
127	Помещение	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
118	Именная аудитория	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
120	Лаборатория процессов массобр	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
122	Помещение	Департамент управления ин	Директор Департамента Управ	+7 701 760 77 33	По расписанию
133	Компьютерный класс	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
131	Учительская	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	ППС
129	Помещение	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
112	Специальная аудитория об автог	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
114	Комната докторантов	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	Докторанты
116	Помещение	Департамент управления ин	Директор Департамента Управ	+7 701 760 77 33	По расписанию
119	Специальная аудитория по черно	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
121	Помещение кафедры Металлургии	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
123	Учебная лаборатория	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
125	Дипломированная проектирово	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
111	Научно-исследовательская лабо	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	ППС
101	Именная аудитория	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	По расписанию
	Помещение инвентаря спорт.зал	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	ППС
102	Преподавательская кафедры	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	ППС
104	Мужская раздевалка	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	По расписанию
	Душ М	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	По расписанию
106	Женская раздевалка	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	По расписанию
	Душ Ж	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	По расписанию
108	Научно-исследовательская лабо	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	ППС
110	Именная аудитория	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
113	Учебная аудитория	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
115	Помещение	Департамент управления ин	Директор Департамента Управ	+7 701 760 77 33	По расписанию
117	Учебная аудитория	Кафедра металлургии	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
101(2)	Помещение	Кафедра Физической культур	Командант ГМК	+7 777 615 54 60	По расписанию
	Спорт-зал	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	По расписанию
	С/У Ж	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	Свободный
	С/У М	Кафедра Физической культур	Заведующий кафедрой физичес	+7 701 523 76 26	Свободный
	Коридор	Департамент управления ин	Директор Департамента Управ	+7 701 760 77 33	Свободный

Рисунок 2. Пример таблицы сведений о помещениях 1-го этажа восточного крыла здания

Примечание – составлено автором

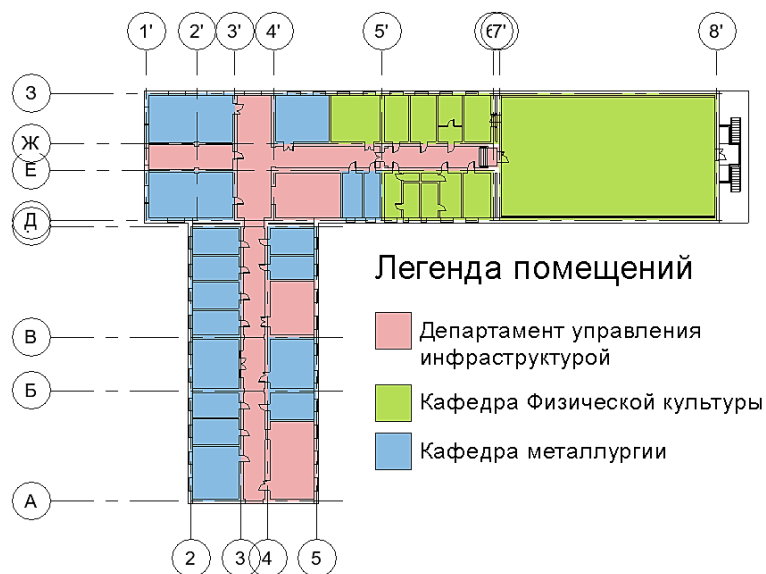


Рисунок 3. Пример зонирования помещений по принадлежности

Примечание – составлено автором

Спецификация дверей		Спецификация дверей	
Тип	Изображение	Тип	Изображение
Дверь-Витраж-полупортка-Остекление		Дверь_Деревянная_Однос творчатая_840x2150	
Дверь_Деревянная_Однос творчатая_880x2200		Дверь_Деревянная_Однос творчатая_840x2150	
Дверь_Деревянная_Двухс творчатая_1260x2170			

Рисунок 4. Пример вывода информации о заполнении дверных проемов

Примечание – составлено автором



Рисунок 5. Примеры вывода информации с информационной модели, общий вид 3-мерной модели этажа

Примечание – составлено автором

На рисунке 6 приведено сравнение двух процессов получения данных – существующего и с использованием информационной модели. Как видно из схемы, использование модели может значительно сократить количество операций и затрачиваемое на них время, что позволит решать задачи в более сжатые сроки. В то же время надо учитывать, что для поддержания модели в актуальном состоянии необходимо вносить изменения в модель при выполнении каких-либо изменений самого здания. Однако эти операции достаточно просты и не требуют много ресурсов (Soliman et al., 2022).



Рисунок 6. Сравнение двух процессов получения данных – существующего и с использованием информационной модели

Примечание – составлено автором

Заключение. В настоящее время мир переживает небывалое развитие технологий. Так называемые технологии 4-й промышленной революции несут в себе огромный потенциал по увеличению эффективности и устойчивости всех сфер человеческой жизни. Однако применение таких технологий зачастую ассоциируется с большими затратами материальных и нематериальных ресурсов. Это отталкивает как индивидуальных пользователей, так и крупные организации. Ресурсоемкость также является одним из главных барьеров внедрения технологий BIM.

Но с развитием современных технологий, в том числе и BIM, многие формы их применения получили широкое распространение и доступны для широкого круга потребителей. Это стало возможным благодаря как более широкому выбору программного обеспечения, так и огромному количеству информации со свободным доступом к самой технологии: всевозможным шаблонам, руководствам и стандартам, разработанным ведущими производственными, государственными и научными институтами.

Благодаря этому применение информационного моделирования сегодня целесообразно не только в высокобюджетных проектах. При весьма ограниченных ресурсах информационная модель может стать эффективным инструментом по управлению инфраструктурой существующих зданий и особенно полезными при управлении сложными разветвленными структурами, такими как университеты и государственные учреждения. Особенно актуально создание информационной модели для старых зданий, по которым не сохранилось проектной и строительной документации. Такая модель позволит значительно упростить и ускорить рутинные операции по получению, хранению и изменению информации, что, в свою очередь, улучшит качество и безопасность эксплуатации. Кроме того, наличие информационной модели представляет собой основу для применения более сложных ресурсоемких технологий впоследствии. Также использование информационной модели позволит получать информацию о здании более широкому кругу пользователей: профессорско-преподавательскому составу, студентам, арендаторам.

Для оптимизации процесса моделирования архитектурно-строительного раздела могут быть применены следующие подходы:

- упрощение стандартов и процедур с учетом ограниченного спектра наиболее востребованных задач для оптимизации моделирования и последующего использования модели;
- уменьшение работ по моделированию за счет использования неграфической информации, привязанной к объектам (большую часть необходимой информации можно привязать к параметрам помещений);
- использование универсальных облачных хранилищ для организации среды общих данных (например, OneDrive);
- использовать приемлемые в рамках основных эксплуатационных задач допуски для оптимизации процесса моделирования геометрии здания.

Для дальнейшего развития проекта рекомендуется:

- расширить использование информационной модели для других зданий университета;
- разработать внутренние BIM_стандарты для Satbayev University на основе полученного опыта;
- исследовать возможности интеграции модели с другими системами управления университетом, такими как системы безопасности и управления доступом.

Данное исследование демонстрирует, что BIM технологии могут быть эффективными и доступными даже при ограниченных ресурсах, что открывает новые перспективы их применения для широкого круга организаций.

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 авторы не использовали генеративный ИИ.

Список литературы

- Alavi, H., & Forcada, N. (2019). BIM LOD for facility management tasks (с. 163). <https://doi.org/10.35490/EC3.2019.187>
- Evans, J. (2022, январь 21). One open common data environment to rule them all? BIM+. <https://www.bimplus.co.uk/one-open-common-data-environment-to-rule-them-all/>
- Inojosa, L., & de Araújo Vilanova, K. (2023). BIM interoperability in the maintenance planning process for existing buildings. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8, 45. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00292-4>
- Jung, J., Hong, S., Jeong, S., Kim, S., Cho, H., Hong, S., & Heo, J. (2014). Productive modeling for development of as-built BIM of existing indoor structures. *Automation in Construction*, 42, 68–77. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.021>
- Kassem, M., Kelly, G., Dawood, N., Serginson, M., & Lockley, S. (2015). BIM in facilities management applications: A case study of a large university complex. *Built Environment Project and Asset Management*, 5(3), 261-277. Scopus. <https://doi.org/10.1108/BEPAM-02-2014-0011>
- Meschini, S., Pellegrini, L., Locatelli, M., Accardo, D., Tagliabue, L.C., Di Giuda, G.M., & Avena, M. (2022). Toward cognitive digital twins using a BIM-GIS asset management system for a diffused university. *Frontiers in Built Environment*, 8. Scopus. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.959475>
- MIT Facilities-Maps & Floor Plans. (б.д.). Извлечено 7 июль 2024 г., от <https://web.mit.edu/facilities/maps/standards.html>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. <https://doi.org/10.1002/9781119287568>
- Solanki, D., Raichura, P., Pitroda, Dr. J., & Macwan, E. (2024). Enhancing Construction Project Management through the Implementation of Revit for Effective Planning and Coordination: A Review. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC RESEARCH IN ENGINEERING AND MANAGEMENT*, 08, 1–7. <https://doi.org/10.55041/IJSREM39400>
- Soliman, K., Gunduz, M., Tokdemir, O., Faqih, F., & Zayed, T. (2022). BIM-based Facility Management Models for Existing Buildings. *Journal of Engineering Research*, 10, 21–37. <https://doi.org/10.36909/jer.11433>
- Sriyolja, Z., Harwin, N., & Yahya, K. (2021). Barriers to Implement Building Information Modeling (BIM) in Construction Industry: A Critical Review. 738(1). Scopus. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/738/1/012021>
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings— Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38, 109-127. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Wong, J.K. W., Ge, J., & He, S. X. (2018). Digitisation in facilities management: A literature review and future research directions. *Automation in Construction*, 92, 312-326. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.006>
- Wong, J.K.W., & Zhou, J. (2015). Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction*, 57, 156-165. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.06.003>
- Yaskevich, V., Tagliabue, L. C., & Kuspangaliev, B. (2022). Smart campus as a core of project-based BIM education in aeeco, case study in satbayev university, kazakhstan. 3, 0–0. <https://doi.org/10.35490/EC3.2022.165>
- Соколова, Т.Н. (2008). Архитектурные обмеры. *Архитектура-С*. // Sokolova, T.N. (2008). *Arkhitekturnye obmery. Arkhitektura-S*.
- Шаблоны Revit для Казахстана. (б.д.). Извлечено 7 июль 2024 г., от <https://cad.kz/about/news/shablony-revit-dlya-kazakhstana/> // *Shablony Revit dlya Kazakhstana*. (n.d.). Retrieved July 7, 2024, from <https://cad.kz/about/news/shablony-revit-dlya-kazakhstana/>

Information about authors

Yaskevich Vladimir Vladimirovich – Master of Arts in Architecture, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan, v.yaskevich@satbayev.university, <https://orcid.org/0000-0002-5595-3285>, +77773704976.

М А З М Ұ Н Ы

ИНЖЕНЕРИЯ ЖӘНЕ ИНЖЕНЕРЛІК ІС

Абижанова И., Буйткенов Д., Магазов Н., Кусайнов А., Абдулина С. HVOF әдісімен алынған Cr_3C_2 -піср металл керамикалық жабындарының қасиеттеріне бүрку қашықтығының әсерін зерттеу	5
Әділқанова М.Ә., Кокаева Г.А., Ағзамова П.А., Капаров М.А. Қазақстан кен орнының тотыққан мыс кендерін өңдеу технологиясын жетілдіру	15
Бекмырза Ж.А. Қатты ластанған астық дақылдарын өңдеуге арналған таспалы конвейердің динамикалық сипаттарын зерттеу	25
Инсепов Д.Г. Мұнай құбырларын индукциялық жылытуға арналған жиілік түрлендіргішінің жұмыс принциптері	40
Казанцева В.В., Ожигин Д.С., Долгоносоев В.Н. ҰҒА қолдана отырып аэрофототүсірілім деректері бойынша карьер борттарының тұрақтылығының жай күйін бақылау станцияларының жобасы	52
Кожас А.К., Таханов Д.К., Рабатұлы М., Сапинов Г.К., Желдикбаева А.Т. Көлденең кен қабаттарын игеру кезінде жер бетінің шөгуді болжау әдістерін жетілдіру	61
Муздыбаев М.С., Мырзабекова Д.М., Семёнов С.В., Мухамедова А.И., Есеркегенова Б.Ж. Техникалық университеттердің студенттерін оқытудың жаңа тәсілі инженерлік кадрларды сертификаттаудың халықаралық талаптарына сәйкестіктің кепілі ретінде	71
Сағымбекова Э.С., Кожаметов Е.А., Аубакирова Д.М. Ұнтақты металлургияның комбинирленген әдістерімен Ni-Ti-Cu жүйесі негізінде пішінді есте сақтау қабілеті бар қорытпаларды алу	83
Хамитбек А.Х., Кайрбаева А.Е., Бутабаев М.Х., Оралбаев С.Ж., Мухамадиева К.К. Балқарағай жаңғағының механикалық жүктемелер кезінде қабығының бұзылуына және ядроның сақталуына ылғалдылықтың әсерін зерттеу	93
Юров В.М., Жангозин К.Н., Жанабегенов Т.К., Каргин Д.Б. Графен парақтарының оралу мәселесі туралы	101

АҚПАРАТТЫҚ-КОММУНИКАЦИЯЛЫҚ ТЕХНОЛОГИЯЛАР

Әмірханова Д.С., Мамырбаев О.Ж. Блокчейн әдісін қолдану арқылы полисызық алгебра негізіндегі криптография алгоритмін зерттеу және әзірлеу	113
Амирханова А.Г., Кунелбаев М.М., Тюлепбердинова Г.А., Тохтасын М.М., Айдынулы А. Тамақ өнеркәсібіндегі сандық егіздердің қазіргі тенденциялары мен озық технологиялары туралы әдебиеттерге шолу	120
Бизақ Ә.Ө., Сайманова З.Б., Сүлеймен А.Е., Сағатбекова Д.Е., Бигалиева А.З. «Ұлттық сараптама орталығында» өндірістік бақылаудың ақпараттық жүйесін зерттеу және әзірлеу	130
Жаксыбек Д.М., Ахметова Ж.Ж. Попов П., Серимбетов Б.А. Бопсалаушы-бағдарламаның шифрын шешу әдістерінің салыстырмалы талдауы	138
Зуев В.Н., Машаев Е.Ж., Спивак Д.А., Даумова Г.К., Петрова О.А. Шығыс Қазақстандағы көшкін қаупі мониторингінің бағдарламалық-аппараттық кешенін әзірлеу	147
Иманбек Б.Т., Байғараева Ж.Е., Қурманова Н.Н., Болтабоева А.К., Кальпеева Ж.Б. ЖИ және SCADA көмегімен медицинадағы стерильді жағдайларды бақылау мен басқарудың инновациялық тәсілдері	163
Кожаметова Д.О., Калиева С.А., Мухамедрахимова Г.Т., Карымсакова И.Б., Алибекқызы К. Робот манипулятор қозғалысын басқару процесінің компьютерлік моделін құру	177

Нұртай М.Д., Ахметов А., Тау А.Ф., Алина Г.Ж., Мutowина Н.В. «Тоғыз құмалақ» ойынына арналған жасанды интеллект моделін әзірлеу кезінде нығайтып оқытуды қолдану	187
Рахметулаева С., Едилхан Д., Сарсенова Ж. Ауа сапасы мен шуылдың кеңістік-уақыттық талдауы: озық статистикалық әдістер және болжамдау модельдері	200
Сапуанов Б.Ж., Денисова Н.Ф. Мұғалімдердің аттестациядан өтетін көп тілді құжаттарын автоматты іздеу үшін күн өрісін қолдану	210
Тлебалдинова А.С., Кумаргажанова С.К., Смаилова С.С., Конурбаева Ж.Т., Сейтахметова Ж.М. Білім алушылардың цифрлық сәйкестігін қалыптастырудағы мінез-құлық факторларын кластерлік талдау	221
Увалиева И.М., Тезекпаева Ш.Т., Борозенец Д.Р., Қалымбек Ұ. Денсаулық паспорты бағдарламалық жүйесінің есептеу-аналитикалық модульдерін эксперименттік зерттеу	232

СӘУЛЕТ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫС

Абдукаликова Г.М., Утепбергенова Л.М., Шахмов Ж.А., Бакирова Д.Г., Абдымажитова А.А. Сумен жабдықтаудың тиімділігі: судың шығындарын анықтау және алдын алу әдістері	242
Апшикур Б., Ипалаков Т.Т., Алимкулов М.М., Капасов А.К. Терең карьер борттарының орнықты еңістерінің ресурс сақтаушы пішіндері мен параметрлерін негіздеу	252
Баймуратова Л.Т., Мұрат Т.М., Мауленова Г.Д., Куатбаева Т.К., Бакирова Т.Ш. Қарағанды қаласының тарихи орталығының 1950-1970 жылдардағы панельді үйлерін қайта құру ерекшеліктері	263
Есенбаев А.М., Корнилова А.А. Тұрғын ортаның заманауи трансформациялау аспектілері (Астана қ. мысалы негізінде)	275
Жусупов Т.В., Утепов Е.Б., Анискин А., Алдунгарова А.К., Караулов С.А. ГАЖ-да тұрғын үйді жаңғырту және қайта құруды жоспарлау факторы ретінде халықтың тығыздығын кеңістіктік талдау әдісі	283
Касенова А.Н., Ахажанов С.Б., Нургозиева А.Ж. Серпімді негіздегі қатты штампты зерттеу	295
Мулдағалиева А.М., Мамедов С.Э., Баракбаев А.Н., Мусабаев Т.Т., Суранкулов Ш.Ж. Астана қаласындағы Алматы көшесі үлгісінде рекреациялық көшелерді қалыптастырудың сәулет-қала құрылысы әдістері	304
Өжет А., Мусабаев Т.Т., Мамедов С.Э., Феоктистова Е.А., Наумова В.И. Астана қаласының жүйесіндегі жалпы білім беру ұйымдары бас жоспарларының теңгестірілген сәулет-жоспарлық шешімдері	313
Рыскалиев М.Ж., Жарылғапов С.М., Мажитов Е.Б., Кыдырашев А.Б. Цемент тасының қатаю процестеріне көбік түзгіштің әсерін зерттеу	324
Яскевич В.В. Шектеулі ресурс жағдайында инфрақұрылым басқаруының құрылысы үшін BIM технологияларын қолдану: Сәтбаев университетінің тәжірибесі	332

СОДЕРЖАНИЕ

ИНЖЕНЕРИЯ И ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО

Абижанова И., Буйткенов Д., Магазов Н., Кусайнов А., Абдулина С. Исследование влияния дистанции напыления на свойства металлокерамических покрытий $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-niCr}$, полученных методом HVOF	5
Әділқанова М.Ә., Кокаева Г.А., Аезамова П.А., Капаров М.А. Усовершенствование технологии переработки окисленных медных руд месторождения Казахстана	15
Бекмырза Ж.А. Исследование динамических характеристик ленточного транспортера для работы с сильно засоренными зерновыми культурами	25
Инсепов Д.Г. Принципы работы преобразователя частоты для индукционного нагрева нефтепроводов	40
Казанцева В.В., Ожигин Д.С., Долгоносков В.Н. Проект наблюдательных станций за состоянием устойчивости бортов карьера по данным аэрофотосъемки с применением БАС	52
Кожас А.К., Таханов Д.К., Рабатұлы М., Сапинов Г.К., Желдикбаева А.Т. Усовершенствование методов прогнозирования оседания земной поверхности при разработке горизонтальных рудных залежей	61
Муздыбаев М.С., Мырзабекова Д.М., Семёнов С.В., Мухамедова А.И., Есеркегенова Б.Ж. Новый подход к обучению студентов технических университетов как гарантия соответствия международным требованиям сертификации инженерных кадров	71
Сағымбекова Э.С., Кожаметов Е.А., Аубакирова Д.М. Получение сплавов с памятью формы на основе системы Ni-Ti-Cu комбинированными методами порошковой металлургии	83
Хамитбек А.Х., Кайрбаева А.Е., Бутабаев М.Х., Оралбаев С.Ж., Мухамадиева К.К. Исследование влияния влажности на разрушение скорлупы кедрового ореха и сохранность ядра при механических нагрузках	93
Юров В.М., Жангозин К.Н., Жанабергенов Т.К., Каргин Д.Б. К вопросу о короблении графеновых листов	101

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Әмірханова Д.С., Мамырбаев О.Ж. Исследование и разработка алгоритма криптографии на основе полилинейной алгебры с использованием методологии блокчейн	113
Амирханова А.Г., Кунелбаев М.М., Тюлепбердинова Г.А., Тохтасын М.М., Айдынулы А. Обзор литературы о текущих тенденциях и передовых технологиях в области цифровых двойников в пищевой промышленности	120
Бизақ Ә.Ә., Сайманова З.Б., Сүлеймен А.Е., Сағатбекова Д.Е., Бигалиева А.З. Исследование и разработка информационной системы для производственного контроля в «Национальном центре экспертизы»	130
Жаксыбек Д.М., Ахметова Ж.Ж., Попов П., Серимбетов Б.А. Сравнительный анализ методов дешифрования программ-вымогателей	138
Зуев В.Н., Машаев Е.Ж., Спивак Д.А., Даумова Г.К., Петрова О.А. Разработка программно-аппаратного комплекса мониторинга лавинной опасности в Восточном Казахстане	147
Иманбек Б.Т., Байғараева Ж.Е., Қурманова Н.Н., Болтабоева А.К., Кальпеева Ж.Б. Инновационные подходы к мониторингу и управлению стерильными условиями в медицине с использованием ИИ и SCADA	163

Кожаметова Д.О., Калиева С.А., Мухамедрахимова Г.Т., Карымсакова И.Б., Алибеккызы К. Создание компьютерного моделирования процессов управления движением роботов-манипуляторов	177
Нұртай М.Д., Ахметов А., Тау А.Ф., Алина Г.Ж., Мutowина Н.В. Применение обучения с подкреплением при разработке модели ии для игры «Тогыз кумалак»	187
Рахметулаева С., Едилхан Д., Сарсенова Ж. Пространственно-временной анализ качества воздуха и уровня шума: современные статистические методы и прогнозные модели	200
Сапуанов Б.Ж., Денисова Н.Ф. Автоматический поиск мультязычных документов аттестующихся учителей посредством полей даты	210
Тлебалдинова А.С., Кумаргажанова С.К., Смаилова С.С., Конурбаева Ж.Т., Сейтахметова Ж.М. Кластерный анализ поведенческих факторов в формировании цифровой идентичности обучающихся	221
Увалиева И.М., Тезекпаева Ш.Т., Борозенец Д.Р., Қалымбек Ұ. Экспериментальное исследование вычислительно-аналитических модулей программного комплекса паспорта здоровья	232

АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

Абдукаликова Г.М., Утепбергенова Л.М., Шахмов Ж.А., Бакирова Д.Г., Абдымажитова А.А. Эффективность водоснабжения: методы обнаружения и предотвращения потерь воды	242
Апшикур Б., Ипалаков Т.Т., Алимкулов М.М., Капасов А.К. Обоснование ресурсосберегающих форм и параметров устойчивых откосов бортов глубокого карьера	252
Баймуратова Л.Т., Мұрат Т.М., Мауленова Г.Д., Куатбаева Т.К., Бакирова Т.Ш. Особенности реконструкции панельных домов 1950-1970 гг. исторического центра города Караганды	263
Есенбаев А.М., Корнилова А.А. Современные аспекты трансформации жилой среды (на примере г. Астаны)	275
Жусупов Т.В., Утепов Е.Б., Анискин А., Алдунгарова А.К., Караулов С.А. Способ пространственного анализа плотности населения как фактора планирования реновации и реконструкции жилья в ГИС	283
Касенова А.Н., Ахажанов С.Б., Нургозиева А.Ж. Исследование жесткого штампа на упругом основании	295
Мулдагалиева А.М., Мамедов С.Э., Баракбаев А.Н., Мусабеев Т.Т., Суранкулов Ш.Ж. Архитектурно-градостроительные методы формирования рекреационных улиц на примере улицы Алматы в городе Астана	304
Өжет А., Мусабеев Т.Т., Мамедов С.Э., Феоктистова Е.А., Наумова В.И. Сбалансированные архитектурно-планировочные решения генеральных планов общеобразовательных организаций в системе города Астаны	313
Рыскалиев М.Ж., Жарылгапов С.М., Мажитов Е.Б., Кыдырашев А.Б. Исследование влияния пенообразователя на процессы твердения цементного камня	324
Яскевич В.В. Шектеулі ресурс жағдайында инфрақұрылым басқаруының құрылысы үшін BIM технологияларын қолдану: Сәтбаев университетінің тәжірибесі	332

CONTENT

ENGINEERING AND ENGINEERING

Abizhanova I.K., Buitkenov D.B., Magazov N.M., Kusainov A.E., Abdulina S.A. Investigation of the effect of the spraying distance on the properties of Cr ₃ C ₂ -nicr metal-ceramic coatings obtained by the HVOF method	5
Adilkanova M.A., Kokayeva G.A., Agzamova P.A., Kaparov M.A. Improving the technology for processing oxidized copper ores from deposits in Kazakhstan	15
Bekmyrza Zh.A. The study of the dynamic characteristics of a belt conveyor for working with heavy contaminated grain crops	25
Insepov D.G. Principles of operation of a frequency converter for induction heating of oil pipelines	40
Kazantseva V., Ozhigin D., Dolgonosov V. The project of observation stations for the state of stability of the sides of the quarry according to aerial photography using UAS	52
Kozhas A., Takhanov D.K., Rabatuly M., Sapinov G.K., Zheldikbaeva A.T. Improvement of predictive methods for calculating surface subsidence during the development of horizontal ore deposits	61
Muzdybaev M., Myrzabekova D., Semenov S., Mukhamedova A., Eserkegenova B. A new approach to training students of technical universities as a guarantee of compliance with international requirements for certification of engineering staff	71
Sagymbekova E.S., Kozhakhmetov Ye.A., Aubakirova D.M. Production of shape memory alloys based on the Ni-Ti-Cu system by combined powder metallurgy methods	83
Khamitbek A.Kh., Kairbaeva A.E., Butabaev M.H., Oralbaev S.Zh., Muhamadiyeva K.K. Investigation of the effect of humidity on the destruction of the cedar nut shell and the preservation of the kernel under mechanical loads	93
Yurov V.M., Zhangozin K.N., Zhanabergenov T.K., Kargin D.B. To the question of warping of graphene sheets	101

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES

Amirkhanova D.S., Mamyrbayev Zh.O. Research and development of a cryptography algorithm based on polylinear algebra using blockchain methodology	113
Amirkhanova G., Kunelbayev M., Tyulepberdinova G., Tokhtasyn M., Aidynuly A. A review of literature on current trends and advanced technologies in digital twins in the food industry	120
Bizak A., Saimanova Z., Suleimen A., Sagatbekova D., Bigaliyeva A. Research and development of an information system for production control in the «National center of expertise»	130
Zhaksibek D.M., Akhmetova Zh.Zh., Popov P., Serimbetov B.A. Comparative analysis of ransomware decryption methods	138
Zuev V.N., Mashayev Ye.Zh., Spivak D.A., Daumova G.K., Petrova O.A. Development of a software-hardware complex for avalanche hazard monitoring in East Kazakhstan	147
Imanbek B., Kalpeyeva Zh., Kurmanova N., Boltaboyeva A., Baigarayeva Zh. Innovative approaches to monitoring and management of sterile conditions in medicine using AI and SCADA	163
Kozhakhmetova D., Kaliyeva S., Mukhamedrakhimova G., Karymsakova I., Alibekkyzy K. Creating computer simulation of movement control processes of robot-manipulators	177

Nurtay M., Akhmetov A., Tau A., Alina G., Mutovina N. Application of reinforcement learning to develop an ai model for game «Togyz qumalaq»	187
Rakhmetulayeva S.B., Yedilkhan D., Sarsenova Zh. Spatio-temporal analysis of air quality and noise pollution: advanced statistical methods and predictive modeling	200
Sapuanov B., Denissova N. Retrieving date fields in multiple languages for automatic searching of certified teacher documents	210
Tlebalidinova A.S., Kumargazhanova S.K., Smailova S.S., Konyrbayeva Zh.T., Seitakhmetova Zh.M. Cluster analysis of behavioral factors in the formation of students' digital identity	221
Uvaliyeva I., Tezekpaeva Sh., Borozenets D., Kalymbek U. Experimental study of computational and analytical modules of the health passport software system	232

ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION

Abdualikova G.M., Utepbergenova L.M., Shakhmov Zh.A., Bakirova D.G., Abdymazhitova A.A. Water supply efficiency: methods for determining and preventing water losses	242
Apshikur B., Ipalakov T.T., Alimkulov M.M., Kapasov A.K. Substantiation of resource-saving forms and parameters of stable slopes of the sides of a deep quarry	252
Baimuratova L.T., Murat T.M., Maulenova G.D., Kuvatbayeva T.K., Bakirova T.S. Specificities of reconstruction of panel houses in 1950-1970 of the historical center of Karaganda	263
Yessenbayev A.M., Kornilova A.A. Modern aspects of residential environment transformation (on the example of Astana)	275
Zhussupov T.V., Utepov Ye.B., Aniskin A., Aldungarova A.K., Karaulov S.A. Method of spatial analysis of population density as a factor in planning renovation and reconstruction of housing in GIS	283
Kassenova A., Akhazhanov S., Nurgoziyeva A.Zh. Examination of a solid stamp on an elastic foundation	295
Muldagaliyeva A.M., Mamedov S.E., Barakbayev A.N., Mussabayev T.T., Surankulov S.Zh. Architectural and urban planning methods of formation of recreational streets on the example of Almaty street in the city of Astana	304
Ozhet A., Musabaev T.T., Mamedov S.E., Feoktistova Ye.A., Naumova V.I. Balanced architectural-planning solutions of master plans of general educational organizations in the astana city system	313
Ryskaliyev M.Zh., Zharylgapov S.M., Mazhitov Ye.B., Kydyrashev A.B. Investigation of the effect of the foaming agent on the hardening processes of cement stone	324
Yaskevich V.V. Application of BIM technologies for building infrastructure management in resource-constrained conditions: the experience of Satbayev university	332

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-Казхастанского 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 28 наурыз 2025 ж. қол қойылды.
Форматы 84×108/16. Оффсет қағазы.
Көлемі: шартты баспа табағы 36,75, есептік баспа табағы 36,83.
Баспа нұсқасы. Таралымы 50 дана. № 303-2025 тапсырыс.
Бағасы келісім бойынша.

Подписано в печать 28 марта 2025 г.
Формат 84×108/16. Бумага офсетная.
Объем: усл. печ. л. 36,75, уч.-изд. л. 36,83.
Печатная версия. Тираж 50 экз. Заказ № 303-2025.
Цена договорная.

Signed to print on March 28, 2025.
Format 84'108 / 16. Offset paper.
Volume: conventional printing plate 36.75, estimated printing plate 36.83.
Printed version. Circulation 50 copies. Order No. 303-2025.
The price is negotiable.

Шығыс Қазақстан техникалық университеті. 070004, Өскемен қаласы, Протозанов көшесі, 69.
Восточно-Казхастанский технический университет. 070004, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова, 69.
D. Serikbayev East Kazakhstan technical university. 070004, Ust-Kamenogorsk, 69 Protozanov Street.