ISSN 3136-3377
ISSN (Online) 3136-3385

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

№3 (156)/ 2026

Founded in 1995

Published 4 times a year

Astana, 2026

Editor-in-Chief: Baglan Togizbayeva
professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Deputy Editor-in-Chief **Askar Zhussupbekov,** *professor,*
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Executive editor **Alma Zakirova,** *associate professor,*
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial board

Levente Kovács	Prof., Óbuda University, Budapest, Hungary
Aljawarneh Shadi A.	Prof., Jordan University of Science and technology, Jordan
Milani Alfredo	Prof., University of perugio
Rafal Burdzik	Prof., Silesian university of technology, Poland
Akitoshi Mochizuki	Prof., University of Tokushima, Tokushima, Japan
András Molnár	Prof., Óbuda University, Budapest, Hungary
Der Wen Chang	Prof., Tamkang University, Taipei, Taiwan (ROC)
Yoshinori Iwasaki	Prof., Geo Research Institute, Osaka, Japan
Eun Chul Shin	Prof., Incheon National University, Incheon, South Korea
Viktor Kaliakin	Prof., University of Delaware, Newark, Delaware, USA
Rustem Sahapov	Prof., Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan
Tadatsugu Tanaka	Prof., University of Tokyo, Tokyo, Japan
Hoe Ling	Prof., Columbia University, New York, USA
G.Bekmanova	Prof., International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan
Y.Utepov	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
A.Tulebekova	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
M.Zhumagulov	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University,Astana, Kazakhstan
D.Bazarbayev	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University,Astana, Kazakhstan
A.Zabiyeva	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University,Astana, Kazakhstan

Editorial address: Kazhimukhan str 2., of. 424, Z01C0X1
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
E-mail: vest_techsci@enu.kz

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology

Owner: Non-profit joint-stock company «L.N. Gumilyov Eurasian National University»
Periodicity: 4 times a year
Registered by the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan
Rediscount certificate № KZ96VPY00149136 from 18.05.2026
Address of Printing Office: Satpayev str 2., Astana, Kazakhstan, Z01A3B1
L.N. Gumilyov Eurasian National University
Website: http://ejaet.enu.kz

© L.N. Gumilyov Eurasian National University

Бас редакторы: Б.Б.Тогизбаева
т.ғ.д., профессор, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Бас редактордың орынбасары **А.Ж.Жусупбеков,** *т.ғ.д., профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан*

Жауапты редактор **А.Б. Закирова,** *қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан*

Редакция алқасы

Levente Kovács	Профессор, Обуда университеті, Мажарстан
Aljawarneh Shadi A.	Профессор, Иордания ғылым және технология университеті, Иордания
Milani Alfredo	Профессор, Перуджио университеті, Италия
Rafal Burdzik	Профессор, Силезиялық технологиялар университеті, Польша
Akitoshi Mochizuki	Профессор, Токусима университеті, Жапония
András Molnár	Профессор, Обуда университеті, Мажарстан
Der Wen Chang	Профессор, Тамканг Университеті, Тайвань
Yoshinori Iwasaki	Профессор, Гео зерттеу университеті, Жапония
Eun Chul Shin	Профессор, Ичхон ұлттық университеті, Оңтүстік Корея
Viktor Kaliakin	Профессор, Делавэр Университеті, АҚШ
Рустем Сахапов	Профессор, Казан мемлекеттік университет, Ресей
Tadatsugu Tanaka	Профессор, Токио Университеті, Жапония
Hoe Ling	Профессор, Колумбия университеті, АҚШ
Гульмира Бекманова	Профессор, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан
Елбек Утепов	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Асель Тулебекова	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Михаил Жумагулов	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Данияр Базарбаев	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Алия Забиева	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Редакцияның мекен жайы: Z01C0X1, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі, 13 кабинет 424, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті
E-mail: vest_techsci@enu.kz

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology
Меншіктенуші: КеАҚ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті"
Мерзімділігі: жылына 4 рет
Қазақстан Республикасының Мәдениет және ақпарат министрлігімен тіркелген 18.05.2026ж. № KZ96VPY00149136 қайта есепке қою туралы куәлігі
Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі 2, Z01A3B1
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті
Сайт: http:// ejaet.enu.kz

© Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

№3 (156)/2026

CONTENT / МАЗМҰНЫ

Construction
Құрылыс

Xuekelaiti Haiyirete, Wenjuan Zhang , Yaqiang Huang
Optimizing Hospital Bed Operations ：A Space Syntax and Discrete Event Simulation Study 7

A.Aniskin , K. Moskalova , M. Orešković , A. Crnoja
The Müller–Breslau passive earth pressure coefficient: validity domain, degeneracy and quantification of the planar failure-surface error 19

D.O. Bazarbayev , D.K. Zhumadullaev, L.I. Ramatullaeva, S.S. Shukirova B.T. Uakhitova
Transformative Potential of Artificial Intelligence for Enhancing Efficiency, Labor Productivity and Quality in construction sector in Kazakhstan 42

Architecture
Сәулет

Saierjiang·Halike， Wei Tangzhi
Exploration of Sustainable Development Pathways for Rural Revitalization in Arid Regions: An Empirical Study of Xinjiang Based on Human Settlements Science 59

D.Ye. Sarsembayeva
Social infrastructure facilities in the structural units of the city of Astana (based on field studies)
Д.Е. Сарсембаева
Объекты социальной инфраструктуры в структурных единицах города Астаны (по данным натурных исследований) 73

M. S. Yugay, O. N. Semenyuk
Comparative analysis of international and national standards in the field of healthcare facilities design. 85

D.B. Baimuldina, S.Sh. Sadykova
Principles of Architectural and Spatial Planning of Secondary Vocational Education Institutions in Kazakhstan
Д.Б. Баймулдина, С.Ш.Садыкова
Принципы архитектурно-планировочной организации учреждений среднего профессионального образования Казахстана 97

Transport
Көлік

S.Zh. Kabikenov, V.V. Shalaev, G.V. Kiseleva, S.Yu. Kutyenko
Calculation, Control and Analysis in Warehouse Inventory Management
С.Ж. Кабикенов, В.В. Шалаев, Г.В. Киселёва, С.Ю. Кутьенко
Расчёт, контроль и анализ в управлении складскими запасами 120

A.K. Togusov, T.A. Kurmangazhinov, E.S. Seitov, M.D. Alimzhanov, A.B. Kaliyev
Theoretical justification of a computational model of a protective frame for armored vehicles against unmanned aerial vehicles
А.К. Тогусов, Т.А. Курмангажинов, Е.С. Сеитов, М.Д. Алимжанов, А.Б. Калиев
Теоретическое обоснование расчетной модели защитного каркаса бронетанкового вооружения и техники от беспилотного летательного аппарата 139

T.N. Bekenov, Z.K. Sattinova, Zh.T. Nussupbek, Zh.T. Tassybekov
Investigation of the dynamics of the vibrating system of a moving vehicle 149

Zh.T. Zhumasheva, Y.N. Zholdassov, Zh. Zh. Baigunchekov, A. Abekova, G.Zh Khamitova
Kinematic analysis of the Zhugirmek v1.0 robotic arm
Ж.Т. Жумашева, Е.Н. Жолдасов, Ж.Ж. Байгунчеков, А.Ж. Абекова, Г.Ж Хамитова
Кинематический анализ роботизированной руки Zhugirmek v1.0 161

Mechanical engineering
Машина жасау

E.A. Zhidebayev, O.A. Shokhaev, A.A. Volnenko, D.K. Zhumadullayev
Calculation of the Design Parameters of Regular Packing in a Heat and Mass Transfer Apparatus with Pipe-Strings
Е.А. Жидебаев, О.А. Шохаев , А.А. Волненко , Д.К. Жумадуллаев
Расчет конструктивных параметров регулярной насадки тепломассообменного аппарата на трубах-струнах 174

Zh. Kossybayev, B. Zhakishev, A. Mustafa
Forecasting electrical losses during the operation of machinery and equipment using artificial intelligence methods
Ж. З. Косыбаев , Б.А. Жакишев , Ә.Т. Мұстафа
Прогнозирование электрических потерь при эксплуатации машин и оборудования на основе методов искусственного интеллекта 193

A.A.Jomartov, A.E. Abduraimov, A.N. Kamal
Experimental Studies of an Earthquake Simulator Based on a Cable Parallel Robot
А.А.Джомартов, А.Е.Абдураимов , А.Н.Камал
Экспериментальные исследования симулятора землетрясения на основе тросового параллельного робота 206

Computer science
Есептеу техникасы

A.Alkhanova
Methods of source code summarization: from abstract syntax trees to heterogeneous graph neural networks 222

Zh.E.Kenzhebayeva, D.K.Samalikova , A.A.Zhotabaeva, R.M.Bainazarova
Methods for improving artificial intelligence algorithms based on BIG DATA
Ж.Е.Кенжебаева, Д.К.Самаликова, А.А.Жотабаева, Р.М.Байназарова
BIG DATA негізінде жасанды интеллект алгоритмдерін жетілдіру әдістері 234

I.A. Zaharov, A.B. Kussainov, M.M. Almenbayev, Zh.K. Makishev, B.G. Salauat
Modeling the optimal flight route of an unmanned aerial vehicle for conducting forest fire exploration 244

I. Seniushin, N. Glazyrina, R. Ibrayev , Y. Atanbayev
Development Flow of a Digital Signature Cryptographic Controller with FPGA Verification and MPW Prototyping 254

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Article https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-7-18

Optimizing Hospital Bed Operations：A Space Syntax and Discrete Event Simulation Study

Xuekelaiti Haiyirete*[1,2,3], Wenjuan Zhang [1,2], Yaqiang Huang [1,2]

[1] Xinjiang Xindewang Construction Project Management Consulting Co., Ltd, Urumqi, China
[2] College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi, China
[3]Xinjiang Key Laboratory of Building Structure and Earthquake Resistance, Xinjiang University, Urumqi, China

E mail: [1]xuekelaiti@xju.edu.cn, [2]107552304748@stu.xju.edu.cn, [3]107552404522@stu.xju.edu.cn

Abstract. The conflict between rigid spatial layouts of hospital inpatient units and dynamic healthcare demands causes structural inefficiencies in bed utilization. Existing research often treats space as homogeneous, neglecting its impact on scheduling decisions. To address this issue, this study proposes a framework integrating Space Syntax and discrete-event simulation. A Spatial Friendliness Index is constructed to quantify the flexible potential of ward units, incorporating spatial synergy, nursing coverage, and vertical accessibility. This index is embedded as a decision parameter into a dynamic bed-scheduling model. The efficacy of different scheduling strategies is evaluated through simulation experiments. Results show that the framework effectively identifies highly flexible spaces. The robust optimization strategy enhances operational efficiency and spatial care quality simultaneously. This finding provides a practical guideline: inter-departmental cooperation should be spatially informed rather than blind. By identifying highly flexible units, hospitals can enable effective cross-departmental bed sharing without expanding collaboration to all units, reducing coordination costs and avoiding inefficient transfers across spatially incompatible wards. This study confirms the effectiveness of translating spatial attributes into operational decision parameters for achieving spatial resilience in hospital design.

Keywords: spatial friendliness index; space syntax; discrete-event simulation; hospital bed management; cross-departmental coordination.

Received 14.06.2026. Revised 28.08.2026. Accepted 15.09.2026. Available online 30.09.2026.

* the correspondence author

Introduction

The spatial performance of hospital buildings, serving as a critical medium linking physical infrastructure with operational objectives, directly constrains the efficiency and quality of healthcare services [1]. A central challenge in current hospital planning and design is the lack of effective tools to predict and evaluate the performance of different spatial layouts under dynamic operational conditions during the planning phase. This deficiency makes it difficult for design decisions to avoid efficiency bottlenecks caused by inherent spatial performance shortcomings. A direct manifestation of this contradiction is the structural dilemma observed in many newly built hospitals, which simultaneously exhibit high bed occupancy rates and long patient waiting times shortly after commencing operations[2,3]. The root cause can be attributed to the dual locking of core resources by the "siloed" spatial layout and departmental operational models. This results in critical resources, such as hospital beds, being pre-allocated to specific departments by the architectural structure, thereby creating a structural contradiction between the built environment and operational demands, which leads to a loss of functional flexibility in the facility[4]. Consequently, the inherent rigidity of the architectural space severely undermines its capacity to adapt to seasonal and sudden demand fluctuations[5], ultimately manifesting as a systemic imbalance characterised by the coexistence of localized overload and overall underutilisation of spatial resources.

On the academic research front, operations management studies primarily employ queuing theory, mathematical programming, and simulation optimisation to improve bed utilisation efficiency[6]. However, such research typically simplifies hospital space into a homogeneous background container. The theoretically optimal models constructed under this premise overlook critical real-world spatial constraints, such as travel distance, monitoring blind spots, and vertical transportation efficiency[7]. Even with the introduction of discrete-event simulation[8], most models remain confined to single departments[9]. and fail to account for the spatial costs arising from cross-departmental scheduling. This disconnects renders theoretically optimal solutions significantly less feasible in real-world environments.

In recent years, scholars have increasingly recognized that physical space constitutes a non-negligible rigid constraint as well as a potential enabling factor in resource allocation. The impact of the COVID-19 pandemic, in particular, has intensified the demand for in-depth research on hospital spatial resilience[10]. The "user activity-space mapping" theory constructed by Le and Haiyirete[4] signified a shift within this school from descriptive analysis towards practical functional conversion. Nonetheless, the research focus of this field remains predominantly concentrated on long-term functional reconfiguration or macro-level spatial strategies[11,12]. Its methodological strength lies in addressing the macro-level feasibility question of whether a space can be shared, but it falls short of supporting the real-time decision-making problem of which specific space should be prioritised and when.

In summary, bridging the theoretical gap between the static assessment of spatial shareability and the dynamic decision-making of operational schedulability is crucial for enhancing the spatial efficiency of hospital buildings.

To this end, this study constructs an integrated analytical framework that merges the quantification of spatial attributes with operational scheduling decisions. First, based on Space Syntax theory, a Spatial Friendliness Index (SFI) is established to characterise the inherent spatial potential of ward units for supporting cross-departmental patient admission. Second, this index is embedded as a key decision parameter into a dynamic bed scheduling model. The value of this integrated framework is then empirically tested through discrete-event simulation. This research

aims to propel a paradigm shift from spatiality-agnostic operational optimisation and static spatial planning towards real-time, collaborative space-operation decision-making.

The methodology

Study Area and Data

This study uses the sixth-floor nursing unit of a medical inpatient building in a Chinese provincial tertiary hospital as an empirical case study. This unit shows the standardized and modular design common in new inpatient buildings in China, where multi-bed patient rooms (typically 2-3 beds per room) constitute the fundamental spatial unit. Its single-floor layout has features such as spatial repetitiveness, component interchangeability, and functional versatility[13]. For spatial topology modelling, three categories of elements—circulation network, functional nodes, and visual interfaces—are extracted from the floor plan.

In terms of operational simulation, patient arrival rates were calculated using the bed turnover rates for different departments, as given by Wang, Yang, and Li [9]. These rates served as core input parameters. The daily arrival rate for each department was derived based on spatial capacity constraints from the drawings and used as the intensity parameter for a non-homogeneous Poisson process in the simulation. The collaboration pathways between departments were adopted from the department pairing scheme validated in the same study, defining the collaboration rules during simulation.

Spatial Friendliness Index

This study proposes the Spatial Friendliness Index, a composite metric designed to quantify a ward's inherent potential for facilitating cross-departmental bed scheduling. The index is grounded in Space Syntax theory and operationalized using its Visibility Graph Analysis (VGA) method.

The index integrates three core dimensions:

- Space Synergy Degree (SSD): integration and centrality within the floor plan topology.
- Monitoring Coverage Degree (MCD): visual supervision effectiveness from the nurse station.
- Vertical Accessibility Degree (VAD): travel efficiency to the elevator lobby.

All three dimensions follow standard Space Syntax procedures, ensuring scale-independence and comparability.

Dynamic Scheduling Model Construction

A data-driven discrete-event simulation (DES) model was constructed using MATLAB R2024b. As illustrated in Figure 1, the model treats all hospital beds as a unified, schedulable resource pool, thereby breaking down fixed departmental barriers.

Entity and Resource Definition: Patients are modelled as active entities with metadata including assigned department, arrival time, length of stay, and allocated bed. Beds are defined as key constrained resources with dynamic states.

Patient Arrival and Generation: Patient arrivals are modelled as a non-homogeneous Poisson process based on the mean daily arrival rate for each department. Newly generated patients enter a central waiting queue adhering to a First-In-First-Out (FIFO) principle.

Bed Allocation Logic: A hierarchical priority strategy is employed. Patients are first matched with available beds within their primary department. When the primary department's resources are saturated, and the waiting queue reaches a predefined threshold, the system triggers cross-departmental collaboration based on predefined pathways.

Discharge and Resource Release: When the system time reaches a bed's scheduled discharge time, its status is automatically reset to "available", and it is immediately returned to the resource allocation cycle.

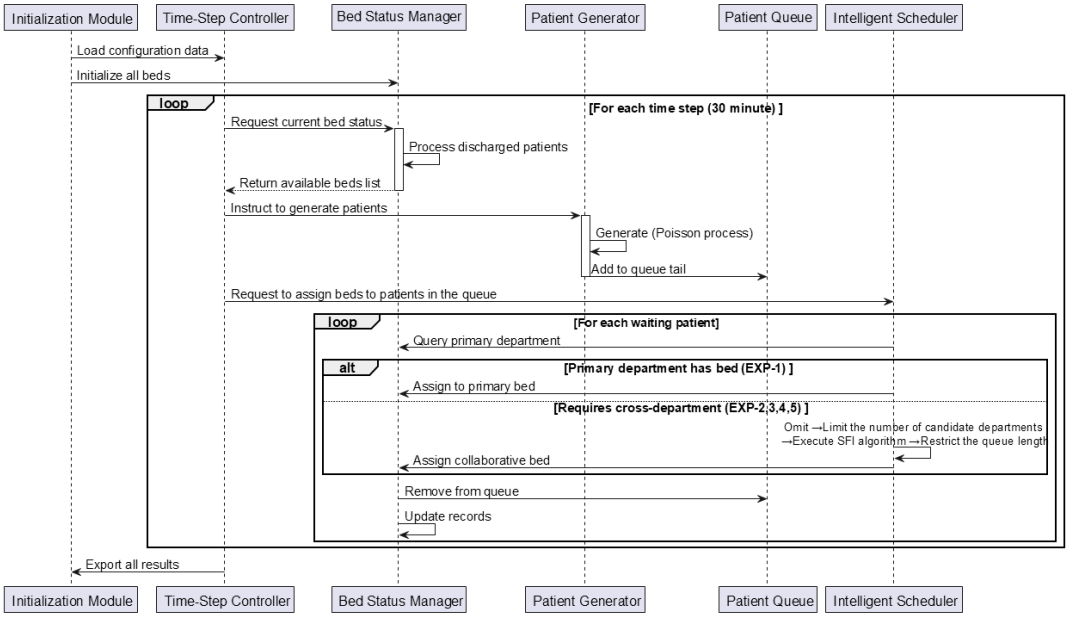


Figure 1. Detailed flow diagram of the experimental progression

Simulations run for 821 days (January 2024 – March 2026) with a 30-minute time step. A fixed random seed (42) is used for reproducibility. To eliminate initial transient effects, data collection starts from day 366 (January 1, 2025).

Simulation Experiment Design

The experimental design adheres to the principles of controlled variables and progressive optimisation. Through five sets of progressively structured experiments, the study systematically evaluates the independent contribution and synergistic effects of each scheduling strategy. The core characteristics and design objectives of the five experimental strategies are summarised in Figure 2.

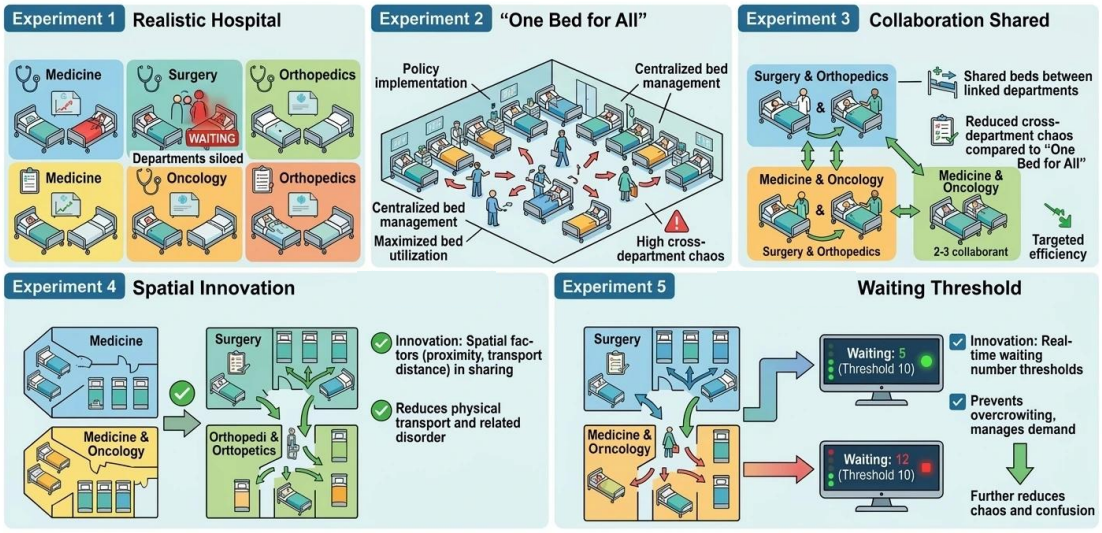


Figure 2. Configuration of the five scheduling strategies.

Exp-1 simulates current practice, serving as the performance baseline. Exp-2 explores the theoretical upper limit of resource sharing. Exp-3 introduces practical constraints, balancing flexibility and controllability. Exp-4 embeds the Spatial Friendliness Index (SFI) into bed allocation decisions. Exp-5 adds a load-aware adaptive mechanism for robustness against demand fluctuations.

Findings/Discussion

Spatial Friendliness Assessment

This study conducted a quantitative assessment of the nursing unit's spatial performance using Visibility Graph Analysis (VGA) from Space Syntax, based on a visibility model with a 550 mm grid resolution. Table 1 comprehensively presents the performance of the 17 patient rooms across the three dimensions—SSD, MCD, and VAD.

Table 1. Spatial Friendliness Index (SFI) distribution of patient rooms.

Room No.	SSD	MCD	VAD	R	SSD	MCD	AD
601	3.9493	0.9026	35.6826	610	4.0856	0.3154	17.3341
602	4.0177	1.1037	34.2677	611	4.6809	0.9388	14.3937
603	5.0008	0.7920	31.4747	612	4.0968	0.7796	13.5021
604	4.6325	1.1571	30.4958	613	4.1564	1.0132	11.0301
605	4.1224	0.7586	27.1503	614	4.5633	0.8143	10.8825
606	3.9344	0.9942	25.7897	615	4.0689	1.0386	12.2397
607	4.3787	0.2867	22.8699	616	3.8990	0.9052	13.8604
608	4.5573	0.4355	21.5654	617	4.3083	1.0066	16.1645
609	4.4815	0.1564	18.6684				

SSD analysis. SSD values range from 3.8990 to 5.0008, indicating significant variation in topological integration. Room 603 acts as the topological core (SSD=5.001), suggesting its potential as a hub for cross-departmental collaboration. In contrast, Room 616 (SSD=3.899) is located at the network periphery. Rooms with high SSD values (e.g., Rooms 603, 604, 608, 614) cluster in the central ward zone, forming a core area with high collaboration potential, while low-SSD rooms (e.g., Rooms 601, 606, 616) are pushed towards the periphery.

MCD analysis. MCD values fluctuate significantly from 0.156 to 1.157, confirming pronounced inequity in visual coverage. Room 609 has the best monitoring condition (MCD=0.156), indicating nearly unobstructed visual supervision from the nurse station. In contrast, Rooms 602, 604, and 615 are monitoring blind spots (MCD > 1.0), obstructed by dense partitions. Overall, MCD exhibits a radial decay pattern from the nurse station. This finding suggests that in similar healthcare layouts, the placement of functional partitions must be carefully evaluated to avoid disrupting visual accessibility.

VAD analysis. The shortest path distance from patient rooms to the elevator lobby ranges from 10.88 meters to 35.68 meters, implying a potential disparity of over threefold in emergency response routes. Room 614, adjacent to the elevator lobby, has the highest vertical accessibility (VAD=10.88 m). In contrast, Room 601 at the ward terminus has the lowest (VAD=35.68 m). A critical case is Room 604: although its straight-line distance to the elevator is short, the actual path length is 30.5 meters due to obstruction by an equipment room. This confirms that in healthcare spatial performance evaluation, topological path length is a more scientific criterion than

Euclidean distance.

The entropy weight method[14] is used to objectively determine indicator weights based on data variation. The procedure includes normalisation, entropy calculation, and weight normalisation.

The entropy weight method yields the following weights: MCD 48.30%, VAD 41.25%, and SSD 10.46%. This indicates that visual monitoring efficiency and vertical accessibility are the key determinants of Spatial Friendliness in this case, outweighing planar topological integration.

The calculated SFI values are shown in Figure 3. The SFI values range from 0.8888 to 3.5837, exhibiting a substantial range of 2.6949. This indicates extremely significant differences in the comprehensive spatial performance among the rooms.

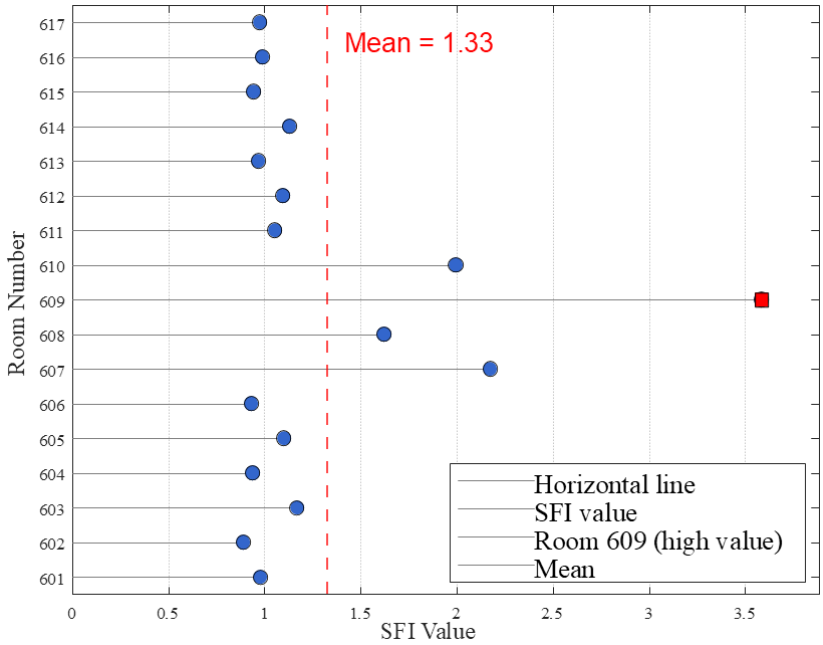


Figure 3. Spatial Friendliness Index (SFI) values of patient rooms.

Based on SFI distribution, rooms fall into three tiers:

Tier 1 (SFI > 2.0): This tier contains only Room 609 (SFI=3.5837). Its SFI value is substantially higher than the rest, exceeding the highest value in Tier 2 (Room 607, SFI=2.1737) by 64.9%. Its exceptional performance is primarily attributed to its optimal monitoring coverage (best MCD) and good vertical accessibility, establishing it as the absolute benchmark for comprehensive spatial performance.

Tier 2 (1.0 < SFI ≤ 2.0): This tier comprises 8 rooms (Rooms 607, 608, 610, 603, 605, 614, 612, 611), accounting for 47.1% of the total. The SFI values within this tier are relatively evenly distributed but show noticeable internal variation, encompassing performance levels from upper-medium to medium.

Tier 3 (SFI ≤ 1.0): This tier includes the remaining 8 rooms (Rooms 602, 615, 613, 606, 604, 617, 616, 601), also constituting 47.1% of the total. The SFI values in this tier are generally low and concentrated, indicating that nearly half of the rooms are in a less ideal state regarding overall spatial friendliness.

Simulation Results

To validate the simulation model, the baseline scenario (Exp-1, no cross-department scheduling) was run and compared with actual hospital operational data. As shown in

Table 2, the comparison of bed turnover rates for each department confirms the model's accuracy in replicating real-world operations.

Table 2. Comparison of simulated and actual bed turnover rates for model validation.

Agreement Level	Dept.	Discharges	Period turnover	Simulated annual turnover	Actual annual turnover	Relative error	Absolute error
High Agreement	D-1	1143	24.85	18.82	18.31	2.79%	0.51
	D-4	1158	25.17	19.07	18.21	4.71%	0.86
	D-7	738	16.04	12.15	12.38	1.84%	0.23
	D-8	1178	25.61	19.40	19.30	0.50%	0.10
	D-14	641	13.93	10.55	10.05	5.02%	0.50
	D-15	1076	23.39	17.72	18.00	1.57%	0.28
Basically Accurate	D-2	796	17.30	13.11	14.58	0.10%	1.47
	D-3	754	16.39	12.42	13.30	6.65%	0.88
	D-9	754	16.39	12.42	13.53	8.24%	1.11
	D-10	959	20.85	15.79	17.42	9.35%	1.63
	D-13	1108	24.09	18.24	16.33	11.72%	1.91
Outliers	D-5	1481	32.20	24.39	20.22	20.61%	4.17
	D-6	1783	38.76	29.36	40.33	27.20%	10.97
	D-11	822	17.87	13.54	16.85	19.67%	3.31
	D-12	696	15.13	11.46	15.29	25.05%	3.83

Among the 15 departments, 11 (73.3%) had absolute errors within 11.8%, including six departments with errors below 5.1% (D-1, D-4, D-7, D-8, D-14, D-15).

Table 3. Summary of key performance indicators: Exp-2 vs. Exp-1

Dept.	Bed Utilisation Rate		Number of Patients Discharged		Bed Turnover Rate			Avg. Patient Waiting Time (h)	
	Exp-1	Exp-2	Exp-1	Exp-2	Exp-1	Exp-2	Rate of Change	Exp-1	Exp-2
D-1	92.17%	95.33%	1143	1177	18.82	19.32	2.56%	72.76	2.02
D-2	86.68%	72.04%	796	800	13.11	13.13	0.17%	8.65	2.12
D-3	81.78%	91.13%	754	753	12.42	12.36	0.47%	152.21	2.09
D-4	78.64%	78.45%	1158	1160	19.07	19.04	0.16%	8.71	2.22
D-5	80.25%	92.15%	1481	1454	24.39	23.86	2.20%	167.83	2.30
D-6	69.43%	126.51 %	1783	3128	29.36	51.33	42.81%	2218.88	2.37
D-11	93.71%	109.24 %	822	1105	13.54	18.13	25.36%	1274.14	2.19
D-12	72.17%	121.68 %	696	1084	11.46	17.79	35.58%	1753.39	2.07
Mean15 depts）	82.46%	92.78%	1005	1164	16.56	19.10	0.09	476.58	2.14

Four departments (D-5, D-6, D-11, D-12) showed larger errors (12%–27%), potentially due to case mix differences. The validation confirms that the simulation model reliably replicates real operational patterns.

Building upon the validated model, this study evaluated the full cross-departmental scheduling strategy (Exp-2). As shown in

Table **3**, Exp-2 achieved substantial improvements in resource utilisation, service throughput, and patient experience.

Resource utilisation. Hospital-wide average bed utilisation rose from 82.46% (Exp-1) to 92.78% (Exp-2), indicating effective reduction of bed idle time. However, the improvement was uneven: some departments (e.g., D-6 and D-12) exceeded 100% utilisation (up to 126.51%), creating new operational bottlenecks.

Service throughput. Average patient throughput increased from 1005 to 1164 (+15.8%), and annual bed turnover rose from 16.56 to 19.10 (+15.3%), demonstrating significantly accelerated bed utilisation frequency.

Patient waiting time. Average waiting time dropped from 476.58 hours (Exp-1) to just 2.14 hours (Exp-2), a 99.6% reduction. This shows that full sharing virtually eliminates patient boarding caused by departmental bed saturation.

Departmental variation. Turnover rate increases were highest in D-6 (+42.8%) and D-12 (+35.6%), consistent with their >100% utilisation. These departments acted as core resource pools within the new scheduling paradigm.

Despite its theoretical efficiency, Exp-2 disregards clinical boundaries and creates local overload, motivating the need for a limited collaboration scheme.

Using the limited collaboration framework (n=3), this study further introduced the Spatial Friendliness Index (SFI) and staffing constraints to evaluate their nuanced impact on system performance. As presented in Figure 4 and Table 4, the operational results of three progressively optimised strategies were compared: Exp-3 (baseline with limited cross-departmental scope), Exp-4 (adds SFI-based allocation), and Exp-5 (adds a three-nurse load threshold to Exp-4).

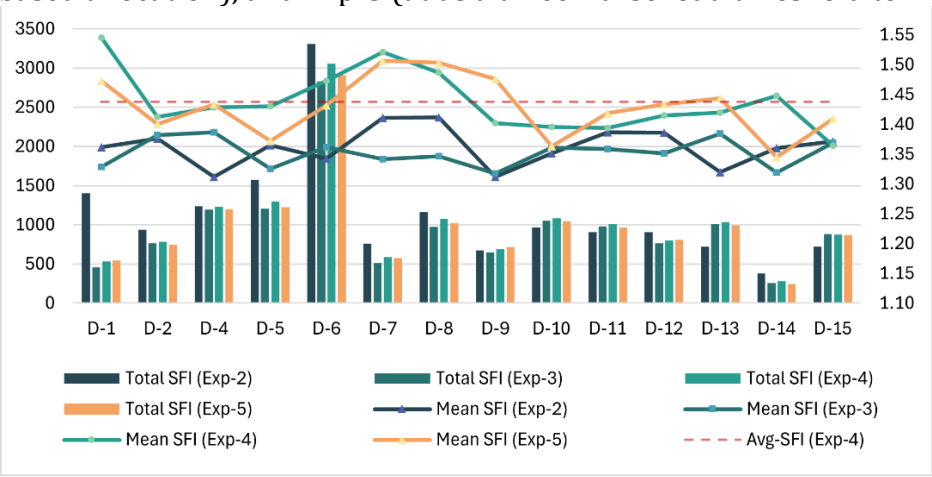


Figure 4. Comparison of Spatial Friendliness Index (SFI) under different scheduling strategies.

In terms of hospital-wide overall performance, the three optimisation strategies demonstrated comparable operational efficiency and scheduling intensity, but exhibited key differences in Spatial Friendliness.

Exp-3 and Exp-4 had identical waiting time (6.38 h) and scheduling frequency (712.9). Exp-5

reduced scheduling frequency to 693.9 but slightly increased waiting time to 6.60 h. For SFI, Exp-4 achieved the highest hospital-wide average (1.44), compared to 1.35 in Exp-3. Exp-5 had a similar SFI (1.43), indicating that the personnel threshold did not compromise spatial friendliness.

Department-level analysis shows that SFI-based allocation improved bed-patient matching without changing operational metrics. Although waiting times and scheduling frequencies were identical between Exp-3 and Exp-4, Exp-4 achieved higher average SFI values for most departments (e.g., D-1). This confirms that the SFI-based algorithm consistently selects spatially superior beds among operationally equivalent options.

Table 4. Summary of waiting time and cross-department scheduling

Dept.	Avg. Patient Waiting Time (h)				Cross-Department Scheduling			
	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5	Exp-2	Exp-3	Exp-4	Exp-5
D-1	2.02	3.02	3.02	2.98	1028	346	346	371
D-2	2.12	7.15	7.15	6.75	682	554	554	532
D-4	2.22	7.59	7.59	8.00	942	862	862	838
D-5	2.30	15.40	15.40	16.22	1152	909	909	891
D-6	2.37	4.57	4.57	4.98	2465	2077	2077	2031
D-11	2.19	11.86	11.86	10.84	654	723	723	684
D-12	2.07	5.68	5.68	5.86	654	565	565	564
Mean（）	2.14	6.38	6.38	6.60	823.07	712.93	712.93	693.86

The personnel threshold (Exp-5) reduced scheduling frequency for departments frequently used as receivers (e.g., D-2, D-4, D-5), decreasing total scheduling instances. This confirms that the threshold acts as a safety valve, preventing staff shortages at the cost of a marginal waiting time increase.

Conclusion

Interpretation of SFI Results

The SFI assessment reveals inherent trade-offs among spatial performance dimensions. Maximising planar integration (SSD) may compromise vertical accessibility (VAD), as seen in rooms with high SSD but poor elevator access. Conversely, good VAD can compensate for lower SSD, offering advantages in infection control and process compliance.

A similar trade-off exists for monitoring coverage (MCD). High MCD values indicate monitoring blind spots that increase nursing workload, while low MCD values enable unobstructed visual supervision, confirming the critical role of visual accessibility in patient safety.

The entropy weight method objectively determined indicator weights: MCD (48.30%), VAD (41.25%), and SSD (10.46%). This weighting reflects that variation in visual monitoring efficacy is most pronounced, aligning with the safety principle that unobstructed monitoring takes precedence over planar circulation efficiency.

The composite SFI effectively integrates these conflicts. Rooms near the nurse station with convenient vertical access achieve the highest SFI, while rooms with high SSD but poor VAD rank lower. This validates the need for multi-dimensional weighted assessment.

Interpretation of Simulation Results

Exp-2 demonstrates that breaking departmental barriers enables flexible resource reallocation based on real-time demand. Hospital-wide average bed utilisation increased from

82.46% to 92.78%, throughput rose by 15.8%, and waiting time dropped from 476.58 hours to 2.14 hours (a 99.6% reduction). This confirms that cross-departmental scheduling can virtually eliminate patient boarding caused by local bed saturation.

However, Exp-2 also created new problems: some departments exceeded 100% utilisation (up to 126.51%), indicating overload and sustainability risks. Moreover, full sharing disregards clinical boundaries and increases managerial complexity, making it impractical for real-world implementation.

To overcome Exp 2's limitations, three progressive strategies were evaluated:

- Exp 3 (whether to share): limiting sharing to three departments increased waiting time from 2.14 h to 6.38 h but reduced scheduling instances by 13.4%, substantially lowering complexity at an acceptable efficiency cost.
- Exp 4 (how to share): adding SFI-based allocation achieved identical operational performance to Exp 3 but improved average SFI from 1.35 to 1.44 (+6.7%), enhancing spatial quality without additional scheduling overhead.
- Exp 5 (when to share): adding a load-aware threshold further reduced scheduling instances to 693.9, with only a slight waiting time increase to 6.60 h, improving robustness and clinical acceptability.

Exp 4 and Exp 5 represent two distinct optimisation directions: quality enhancement (Exp 4) versus managerial robustness (Exp 5). Both provide feasible best practice options between the theoretical optimum (Exp 2) and basic feasibility (Exp 3).

Implications, Limitations and Future Research

Implications for practice. For hospital designers, the SFI system provides a prospective tool to evaluate spatial layouts before construction, helping to establish high-resilience spatial foundations from the outset. For hospital managers, the optimised scheduling logic can be directly integrated into centralised bed management systems, enabling refined and intelligent bed allocation.

Theoretical contribution. At a broader level, the decoupled optimisation framework—addressing "whether, how, and when to share"—offers a new perspective for resource allocation in complex systems beyond healthcare, such as emergency services or supply chain management.

Limitations and future work. This study focuses primarily on physical spatial attributes. Future research could incorporate environmental psychology factors (acoustics, lighting, thermal comfort) to construct a more comprehensive healing environment framework. The analytical scale could also be expanded from a single floor to three-dimensional vertical spatial networks across entire buildings.

Finally, our conclusions are drawn from a typical standardised nursing unit with multi-bed rooms—a common configuration in China. Generalisability to single-bed room systems (prevalent in other healthcare systems) requires further validation through case studies in diverse hospital settings.

Acknowledgement, conflict of interests

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 72561027), Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous (Grant No. 2023D01C188), Teaching Reform Research Project of Xinjiang Uygur Autonomous (Grant No. XJGXJGPTA-2025003) and Teaching Case Library Construction Project for Professional Degree Postgraduates of Xinjiang University (Grant No. XJDX2025YALK07).

The contribution of the authors

Xuekelaiti Haiyirete – conceptualization, methodology, resources, writing – review & editing, supervision, final approval.
Wenjuan Zhang – data collection, investigation, testing, modeling, formal analysis, visualization, interpretation, writing – original draft.
Huang Qiangqiang – manuscript review, critical feedback, validation of findings.

References

1. J.L. Xu, Y. Peng, C. Ye, S. Gao, M. Cheng. "Hospital Flow Simulation and Space Layout Planning Based on Low-Trust Social Force Model." *IEEE Access,* 12, 2024, https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3420406, pp. 90135–90144, China.
2. Y. Angel, G. Fire. "Healthcare policy changes in an era of health workforce shortage." *Isr J Health Policy,* 12(1), 2023, https://doi.org/10.1186/s13584-023-00576-7, p. 28, Israel.
3. S. Mathew et al. "Primary health care utilisation and delivery in remote Australian clinics during the COVID-19 pandemic." *BMC Prim Care,* 25(1), 2024, https://doi.org/10.1186/s12875-024-02485-3, p. 240, Australia.
4. Y. Le, X. Haiyirete. "Hospital Flexible Space Management Under the Covid-19 Pandemic." *J Tongji Univ (Nat Sci),* 49(2), 2021, https://doi.org/10.11908/j.issn.0253-374x.20391, pp. 289–297, China.
5. X. Huang, S. Liu, L. He. "Management Practice on Hospital Bed-sharing Management in the Context of High-quality Development." *Chinese Hospital Management,* 43(8), 2023, pp. 35–38, China.
6. Y. Cai, H.Q. Song, S. Wang. "Managing appointment-based services with electronic visits." *Eur J Oper Res,* 315(3), 2024, DOI: 10.1016/j.ejor.2024.01.012, pp. 863–878, Netherlands.
7. M. Ordu, E. Demir, C. Tofallis, M.M. Gunal. "A novel healthcare resource allocation decision support tool: A forecasting-simulation-optimization approach." *J Oper Res Soc,* 72(3), 2021, https://doi.org/10.1080/01605682.2019.1700186, pp. 485–500, UK.
8. J. Wang, Z. Dai, X. Hou. "Operating room scheduling for elective patients under cross-department resource sharing." *Syst Eng Theory Pract,* 41(11), 2021, https://doi.org/10.12011/SETP2020-1804, pp. 2947–2962, China.
9. C.L. Wang, F.F. Yang, Q.L. Li. "Optimal Decision of Dynamic Bed Allocation and Patient Admission with Buffer Wards during an Epidemic." *Mathematics,* 11(3), 2023, https://doi.org/10.3390/math11030687, p. 687, Switzerland.
10. L. Carenzo et al. "Hospital surge capacity in a tertiary emergency referral centre during the COVID-19 outbreak in Italy." *Anaesthesia,* 75(7), 2020, https://doi.org/10.1111/anae.15072, pp. 928–934, Italy.
11. N. Moretti, Y.C. Chan, M. Nakaoka, A. Mukherjee, J. Merino, A.K. Parlikad. "Data integration for space-aware Digital Twins of hospital operations." *Automat Constr,* 176, 2025, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106276, p. 106276, Netherlands.

12. X. Haiyirete, J. Wang, X.C. Gan, X.J. Liu, A. Tuluhong. “Automated Mapping Methodology and Case Study of Healthcare User Activities and Spaces from a Sustainable Perspective.” *Sustainability,* 16(3), 2024, https://doi.org/10.3390/su16031241, p. 1241, Switzerland.
13. Y. Shao, L. Zhou, H. Guo. “A Study on Horizontal Optimal Size of the Hospital Ward.” *Archit. J.,* 2, 2019, pp. 7–11, China.
14. R. Kumar et al. “Revealing the benefits of entropy weights method for multi-objective optimization in machining operations: A critical review.” *J Mater Res Technol,* 10, 2021, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.12.114, pp. 1471–1492, Brazil.

Information about the authors:

Xuekelaiti Haiyirete – corresponding author, Ph.D. in Management Science and Engineering, Associate Professor, College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, 666 Shengli Road, 830047, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China.
Wenjuan Zhang – author, Master's student, College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, 666 Shengli Road, 830047, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China.
Yaqiang Huang – author, Master's student, College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, 666 Shengli Road, 830047, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Article https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-19-41

The Müller–Breslau passive earth pressure coefficient: validity domain, degeneracy and quantification of the planar failure-surface error

A. Aniskin*, K. Moskalova, M. Orešković, A. Crnoja

University North, University Centre Varaždin, Varaždin, Croatia

E mail: aaniskin@unin.hr, kmoskalova@unin.hr, moreskovic@unin.hr, acrnoja@unin.hr

Abstract. The Müller–Breslau closed-form coefficient Kp(φ, α, β, δ) is the standard design tool for cohesionless backfill, yet it overestimates passive resistance severely at high wall friction, and its validity domain has never been mapped systematically. Direct numerical minimization of the Coulomb trial wedge reproduces the closed form to machine precision over 45948 admissible combinations (φ = 20–50°), so its difference from Sokolovski's method of characteristics isolates the planar failure-surface error. The closed form diverges exactly on the locus φ+δ+β−α = 90°, where the admissible fan of trial planes closes, although the exact resistance stays finite. The error is unsafe in 99.6% of cells and scales with the margin ε = 90°−(φ+δ+β−α): median overestimation grows from about 2% for ε > 50° to over 50% for ε < 20°, reaching factors of 1.5–5 at δ=φ. Log-spiral, lower-bound, and finite-element limit-analysis bracketing (330 cases, 92.4% within ±1%) and the Kérisel–Absi tables confirm this. The results are condensed into applicability maps with safe, caution, significant-error, and degenerate zones.

Keywords: passive earth pressure, Müller–Breslau formula, Coulomb wedge, method of characteristics, retaining wall, limit equilibrium

Received 01.09.2026. Revised 03.09.2026. Accepted 09.09.2026. Available online 30.09.2026

* the corresponding author

Introduction

The determination of passive earth resistance is a classical problem of soil mechanics whose most influential formulation remains the wedge solution of Coulomb [1]. Its generalization to an inclined wall, sloping backfill and wall friction, given in closed form by Müller-Breslau [2], is the standard closed-form design expression for cohesionless backfill: it appears in identical or lightly modified form in textbooks and numerous national standards, and — through the Mononobe-Okabe extension — in Annex E of Eurocode 8, while Annex C of Eurocode 7 replaces it for the passive case by charts and procedures based on curved slip surfaces — an implicit acknowledgement of the planar-surface error that this study quantifies. The formula expresses the passive earth pressure coefficient K_p as an explicit function of four angles — the soil friction angle φ, the wall inclination α, the backfill slope β and the wall friction angle δ — obtained analytically from the stationarity condition of the resistance with respect to the inclination ρ of a planar trial failure surface.

Two distinct questions accompany any closed-form limit-equilibrium solution: over what parameter domain is the expression valid, and how large is the error introduced by its mechanical idealization? For the passive Müller-Breslau formula, both questions are considerably more acute than for its active counterpart. The planar assumption is known to overestimate passive resistance — an error on the unsafe side wherever the passive resistance is relied upon — and textbooks accordingly warn against the formula for wall friction beyond roughly $\delta > \varphi/3$, recommending curved-surface tables instead [3], [4], [7]. The warning, however, is qualitative: no systematic map exists showing where in the (φ, α, β, δ) space the formula is acceptable, how fast it degrades, and where it fails outright. Such outright failure indeed occurs: unlike the active coefficient, which remains finite over its entire algebraic domain, the passive coefficient grows without bound ($K_p \to \infty$) as the square root in the denominator of (1) approaches unity. This degeneracy has no counterpart in the active case; it is usually mentioned only as an algebraic curiosity and has, to the authors' knowledge, never been mapped, explained mechanically, or connected to the behaviour of the underlying wedge mechanism.

The error of the planar failure surface in the passive case has a long history. Rigorous reference solutions are provided by the method of characteristics of Sokolovski [5], whose framework continues to be applied to passive earth pressure problems [14], [19], and by the log-spiral tables of Caquot and Kérisel [6] and Kérisel and Absi [7], which remain the reference of record in design practice. Within limit analysis [8], kinematic (upper-bound) solutions with translational multiblock and rotational log-spiral mechanisms [9], [10], [24] and static (lower-bound) stress fields — most notably the closed-form solution of Lancellotta [11] — bracket the exact collapse load, and modern finite-element limit analysis provides tight numerical bounds for arbitrary geometries [13]. The slip-line framework has been extended to critical slip fields for both limit states [15], general wall and backfill geometry [16], [17], c–φ and seismic conditions [18], [19], and axisymmetric and kinematic variants [20]–[23]. From these comparisons, it is generally accepted that Coulomb-type solutions may overestimate passive resistance drastically — by a factor of two to three at $\delta = \varphi$ [7], [8]. However, published comparisons typically report differences

between complete computational chains — different numerical methods, discretizations and sign conventions — so that the contribution of the planar surface itself is not cleanly isolated; and the divergence of the closed form is treated as a boundary of the tables rather than as a phenomenon with a mechanical meaning of its own.

The present paper addresses both questions in the unified computational framework developed for the active case in a companion study [25]. First, the admissible domain of the passive Müller-Breslau formula is mapped over the practical range φ = 20–50°, covering the full physical ranges of α, β and δ, and the degeneracy is characterized analytically: a trigonometric identity is derived showing that the radicand reaches unity exactly on the locus φ + δ + β − α = 90°, which is simultaneously the configuration at which the singular direction of the trial-wedge problem reaches the backfill surface and the admissible fan of trial planes closes — the divergence of the formula and the disappearance of the wedge mechanism are one and the same event. Second, the closed form is verified against direct numerical minimization of the Coulomb trial wedge, formulated with two admissibility conditions that are seldom stated explicitly: the geometric bound ρ > β and the singular-direction bound $\rho < \rho_{sing} = 90° - \varphi - \delta + \alpha$, beyond which the force polygon admits only non-physical solutions. The agreement to machine precision over all 45 948 combinations of the parametric (φ, α, β, δ) grid defined in the Methodology establishes that the difference between the Müller-Breslau solution and the method of characteristics is a pure measure of the planar failure-surface error. This error is then quantified over the whole parameter space with a validated passive slip-line solver, cross-checked by an independent rotational log-spiral upper-bound mechanism and by the static lower bound of Lancellotta — so that the exact coefficient is bracketed from both sides — and anchored to the Kérisel-Absi tables. The results are condensed into applicability maps that divide the parameter space into zones of safe application, caution, significant error, and the degenerate zone in which the closed form yields no prediction although the exact resistance remains finite. All results can additionally be explored through interactive web applications provided as supplementary material.

The methodology

The Müller-Breslau closed form and sign conventions

The geometry and sign conventions used throughout this paper are defined in Figure 1 and are identical to those of the companion active-case study [25], with one difference dictated by the passive kinematics: the wall friction angle δ is positive when the soil rises relative to the wall, as it does when passive resistance is mobilized. The wall face is inclined at α to the vertical (positive when the soil rests on the inclined face), and the backfill surface at β to the horizontal (positive upward away from the wall). The passive earth pressure coefficient is given by Müller-Breslau [2] as

$$K_p = \cos^2(\varphi + \alpha) / \{ \cos^2\alpha \cdot \cos(\alpha - \delta) \cdot [1 - \sqrt{(\sin(\varphi + \delta)\cdot\sin(\varphi + \beta) / (\cos(\alpha - \delta)\cdot\cos(\alpha - \beta)))}]^2 \} \quad (1)$$

and defines the total passive resistance per unit length of wall,

$$P_p = ½ \cdot K_p \cdot \gamma \cdot H^2 \quad (2)$$

where γ is the unit weight of the backfill and H the vertical height of the wall; the factor $\cos^2\alpha$ accounts for the increased length of the inclined face. The resultant acts at the angle δ to the normal of the wall face, on the opposite side of the normal than in the active case, so that the horizontal and vertical components follow as

$$P_h = P_p \cdot \cos(\delta - \alpha), \quad P_v = P_p \cdot \sin(\delta - \alpha) \qquad (3)$$

For α = 0, these reduce to the familiar cos δ and sin δ decomposition. Eq. (3) gives the components of the resultant exerted by the soil on the wall, with positive P_v acting upward along the face for δ > α; the wall exerts an equal and opposite force on the soil wedge (Figure 1) — the sign convention affects P_v only, the cosine in P_h being an even function. For inclined walls, the use of cos δ alone is a common source of error, as is the confusion between K_p and the horizontal coefficient $K_{ph} = K_p \cdot \cos(\delta - \alpha)$ tabulated by some references. Expression (1) is real-valued for β ≥ −φ and δ ≥ −φ, with the additional requirements α − δ < 90° and |α − β| < 90° for the cosines in the denominator to remain positive. Unlike the active coefficient, however, the passive expression possesses an interior singularity: when the radicand approaches unity, the denominator of (1) vanishes and $K_p \to \infty$. The location and mechanical meaning of this degeneracy are established in the Results.

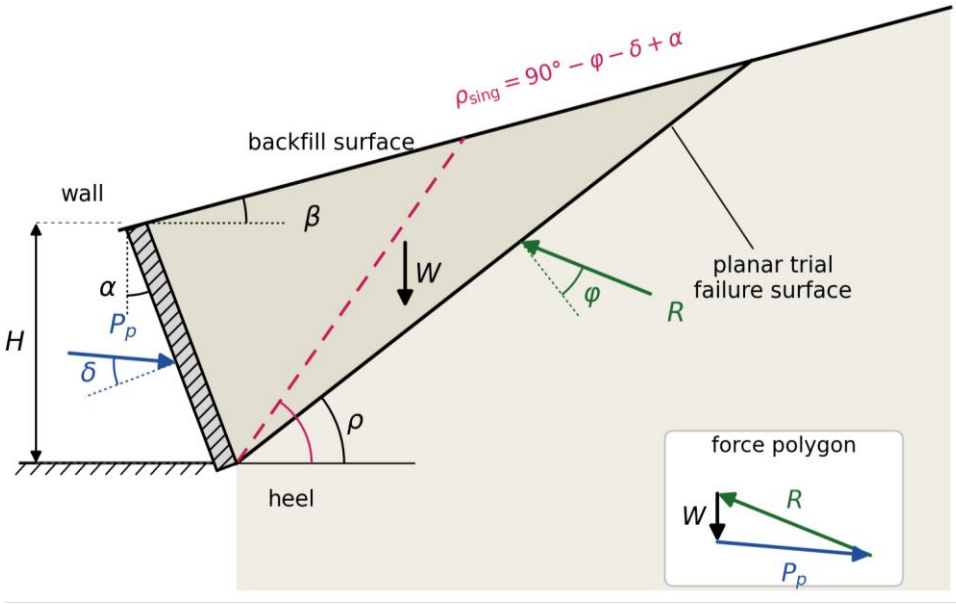


Figure 1. Definition of the geometry, sign conventions and forces of the passive Coulomb trial-wedge problem. All angles are shown in their positive directions; the trial-plane inclination ρ is measured from the horizontal at the wall heel, with the admissible range $\beta < \rho < \rho_{sing}$; the singular direction $\rho_{sing} = 90° - \varphi - \delta + \alpha$ is marked in red. The force polygon is drawn for the wedge: the wall transmits to the wedge a force equal and opposite to the passive resultant P_p.

Direct numerical minimization of the Coulomb wedge

Independently of (1), the passive resistance was computed by direct numerical minimization of the Coulomb trial-wedge problem. For a planar trial surface inclined at ρ to the horizontal and passing through the wall heel (Figure 1), the equilibrium of the wedge under its weight W, the reaction R on the slip plane (inclined at φ to the plane's normal, opposing the upward motion of

the wedge) and the thrust transmitted by the wall (inclined at δ to the face normal, equal and opposite to the passive resultant P_p) yields the resistance E(ρ) in closed form from the force polygon; the passive resistance is $P_p = \min E(\rho)$. Written as a coefficient, the trial-wedge resistance takes the compact form

$$K_p(\rho) = \cos(\alpha - \beta)\cdot\cos(\rho - \alpha)\cdot\sin(\rho + \varphi) \,/\, [\, \cos^2\alpha \cdot \sin(\rho - \beta) \cdot \cos(\rho + \varphi + \delta - \alpha)\,] \qquad (4)$$

Two admissibility conditions, seldom stated explicitly in the literature, are essential for a robust numerical treatment — and far more restrictive than their active counterparts. First, the trial plane must emerge above the backfill surface, ρ > β; as ρ → β the wedge grows without bound and (4) diverges. Second, the trial plane must remain below the singular direction,

$$\rho < \rho_{sing} = 90° - \varphi - \delta + \alpha \qquad (5)$$

at which the wall and slip-plane reactions become parallel: the last cosine in the denominator of (4) vanishes, the force polygon degenerates, and for $\rho > \rho_{sing}$ equilibrium admits only non-physical solutions with negative force magnitudes. In the active case, the singular direction lies at the outer boundary of the parameter space and merely requires the compression check R ≥ 0; in the passive case, the fan (β, ρ_{sing}) of admissible trial planes narrows rapidly with growing φ, δ and β and with decreasing α, and its width practically defines the usable domain of the wedge model. Since the objective function of the minimization, $K_p(\rho)$ in (4), is defined only on the fan and is infinite outside it, standard derivative-free bracketing minimizers (golden-section search with successive parabolic interpolation, i.e. the Brent family) fail on the resulting plateau; the minimization was therefore carried out by a dense uniform scan of the admissible fan followed by parabolic refinement, which resolves the minimum to machine precision (verified against an independent implementation to within $5\cdot10^{-15}$ relative on a 26-point control table). One further implementation detail deserves emphasis: for β < 0 near the degeneracy locus, the critical inclination itself becomes negative — the critical plane dips below the horizontal (for example, ρcr = −4.8° at φ = 45°, α = 0°, β = −10°, δ = 44°) — so that a search restricted to ρ > 0, as is natural in the active case, silently returns a wrong optimum, in the quoted example 232% above the true one.

Reference solution: method of characteristics

Rigorous reference values were computed with a slip-line solver implementing Sokolovski's method of characteristics for the passive limit state of a cohesionless soil with self-weight [5]. The governing hyperbolic system is integrated along the two characteristic families, marching from the stress boundary condition on the backfill surface toward the wall, with the free parameter iteratively adjusted until the wall friction condition is satisfied. Depending on the parameter combination, the solution takes one of three structures, illustrated in the companion active-case study [25] and in Sokolovski's monograph [5]: (A) a continuous field; (B) a field containing a stress discontinuity; or (C) a degenerate single-zone Rankine-type field when the wall condition is fully consistent with the surface condition. On the parametric grid described below (56 364 cells, of which 770 with |β| ≥ φ are physically inadmissible and 13 did not converge, see the Parametric study subsection), the 55 581 converged solutions divide into 46 339 of structure A, 9 194 of structure B and 48 of structure C; the structure-C cells are confined to the corner of positive wall

inclination with nearly full wall friction ($\alpha \geq +10°$, $\delta/\varphi \geq 5/6$), and it is precisely there that the planar-surface error nearly vanishes (median −0.3%).

The solver was validated in six independent ways. First, for the frictionless vertical wall with horizontal backfill, it reproduces the Rankine value $K_p = \tan^2(45° + \varphi/2)$ to within 0.036% over φ = 20–50°. Second, its results respect the kinematic theorem: all 35 tabulated upper-bound coefficients of Soubra [24] (translational multiblock mechanism, φ = 15–45°, δ/φ = 0–1, vertical wall, horizontal backfill) bound the present solutions from above, with the ratio $K_{p,SOK}/K_{p,UB}$ decreasing smoothly from 1.000 at $\delta = 0$ (both methods exact) to 0.904 at $\varphi = 45°$, $\delta = \varphi$ — consistent with the roughly 12% gap between that mechanism and the Caquot-Kérisel tables reported by Soubra himself. Third, at the classical anchor point $\varphi = 30°$, $\alpha = \beta = 0$, $\delta \to \varphi$, the solver yields $K_p = 6.54$, against approximately 6.55 read from the Kérisel-Absi tables [7]. Fourth, as reported in the next subsection, the solution is bracketed from both sides by an independent upper and lower bound at every verified point. Fifth, the entire rough-wall branch $\delta = \varphi$ was compared with the Kérisel-Absi log-spiral tables [7] over all six friction angles and eleven wall inclinations (66 combinations, converted between normalisations by $K_p = K_{p,K\text{-}A}/\cos^2\alpha$): the median difference is −0.1%, and all readings agree within ±2% except a single one at the two-digit resolution limit of the table. Sixth, as described in the following subsection and in the Results, the solution was bracketed by rigorous finite-element limit-analysis bounds over a 330-case verification matrix. Direct comparison with Sokolovski's own tabulated passive examples is not possible without extension of the present framework, since those examples include a surface surcharge [5]; this extension is left for future work. The mobilized wall friction is capped at the value consistent with the characteristic field ($\delta_{mob} \leq \delta$); the cap was active in only 48 cells of the grid, all flagged — precisely the 48 structure-C cells.

Independent verification: rotational log-spiral upper bound and a static lower bound

As an independent cross-check of the characteristics solution, the passive resistance was additionally bracketed from both sides. From above, a rotational log-spiral mechanism was constructed in the framework of the kinematic theorem of limit analysis [8], [10], mirroring the active-case implementation [25]: a rigid region bounded by the wall face, the backfill surface and a log-spiral slip surface through the wall heel rotates about a center whose two coordinates are the optimization variables; the spiral pitch equals $\tan\varphi$, so that the velocity jump is inclined at φ to the surface and no internal energy is dissipated in the cohesionless soil. The resistance follows from the balance of the work rates of gravity and of the wall reaction, assumed to act at the lower third of the face at the angle δ to its normal, and is minimized over the position of the rotation center. Since the planar wedge is the limiting member of this family as the center recedes to infinity, the mechanism yields $K_{p,LS} \leq K_{p,MB}$, while the kinematic theorem guarantees $K_{p,LS} \geq K_{p,exact}$ for the passive problem; the mechanism therefore brackets the exact coefficient from above while undercutting the planar solution, and provides a one-sided check on the characteristics solution that does not depend on its implementation. The implementation reproduces the Rankine value to within 0.01% in the smooth-vertical-wall limit. From below, the closed-form static solution of Lancellotta [11], derived from a statically admissible stress field with a stress-fan rotation between

the backfill and the wall, provides a rigorous lower bound for the vertical wall with horizontal backfill:

$$K_{p,LB} = [\cos\delta + \sqrt{(\sin^2\varphi - \sin^2\delta)}] / (1 - \sin\varphi) \cdot \exp(2\theta \cdot \tan\varphi), \quad 2\theta = \delta + \arcsin(\sin\delta / \sin\varphi) \qquad (6)$$

written here for the resultant coefficient. Together, the two bounds enclose the exact coefficient in the sandwich $K_{p,LB} \le K_{p,exact} \le K_{p,LS}$, with the characteristics solution expected to fall inside the bracket and the Müller-Breslau value above its upper end wherever the planar error is significant. This bracketing, verified numerically at every control point in the Results, is the passive-case counterpart of the ordering MB ≤ LS ≤ SOK observed in the active study — with the direction of every inequality reversed.

Verification by finite-element limit analysis

Finally, the slip-line solution was verified against independent finite-element limit analyses (FELA) performed with OPTUM G2 [27]. FELA computes rigorous lower-bound (LB) and upper-bound (UB) estimates of the collapse load for an associated Mohr-Coulomb material; since the slip-line solution addresses the same idealised problem (associated flow, rigid wall, full mobilisation of wall friction), the exact coefficient must satisfy $K_{p,LB} \le K_{p,SOK} \le K_{p,UB}$ at every point. The verification matrix comprised the full factorial grid of six friction angles φ = 20–45° (step 5°), five friction ratios $\delta/\varphi \in \{0, 1/3, 1/2, 2/3, 1\}$ and eleven wall inclinations α = −25…+25° (step 5°) at horizontal backfill (β = 0) — 6 × 5 × 11 = 330 combinations — with γ = 20 kN/m^3 and H = 1 m, deliberately including the seventeen combinations beyond the degeneracy locus, where the closed form yields no prediction at all.

Each case was modelled as a rigid, weightless block adjoining the soil, with the wall face represented by a rigid plate and a Mohr-Coulomb interface whose strength-reduction factor was set to $r = \delta/\varphi$; the block was restrained against vertical translation and rotation and pushed horizontally by a unit multiplier load, so that the collapse multiplier equals the horizontal component $P_h = P_p \cdot \cos(\delta - \alpha)$ of the passive resultant. The wall-modelling approach follows Schmüdderich et al. [26]. Both bounds used 10 000 target elements with five (near the degeneracy locus, eight) cycles of adaptive mesh refinement under shear-dissipation control and mesh fans at the wall heel and crest. A prescribed-traction formulation (a distributed load applied directly to the soil boundary, inclined at δ to the face normal) served as a cross-check for $\delta/\varphi \le 2/3$; for δ = φ, that formulation places the boundary traction exactly on the Mohr-Coulomb yield cone and the lower bound degenerates, which is why the rigid-block model was adopted throughout. The outcome of the 330-case programme is reported with the other verifications in the Results.

Parametric study and applicability classification

The parametric grid covers φ from 20° to 50° in steps of 1°, α ∈ {−25, −20, …, +25}°, β from −25° to φ − 2.5° in steps of 2.5°, and δ from 0 to φ in steps of φ/6 — in total 56 364 combinations. Cells with |β| ≥ φ (770) violate the natural stability limit of a cohesionless slope and are excluded as physically inadmissible regardless of the calculation method. The corner δ = φ, at which the radicand of (1) is evaluated on the boundary of its domain, is computed at δ = φ − 0.05° and flagged (8 052 cells). Cells on or beyond the degeneracy locus, ε = 90° − (φ + δ + β − α) ≤ 0, at which the

closed form yields no prediction, are flagged as the degenerate zone D (9 646 cells) — and the characteristics solver is run there regardless, successfully in 9 645 of them. Overall, 55 581 cells (98.61%) yielded a converged characteristic solution; of the non-converged remainder, only 13 cells (0.02% of the grid) represent genuine non-convergence, 11 of them on the steepest admissible backfill line and two isolated cells at high wall friction. For each cell with a defined closed-form value, the relative difference $\Delta = (K_{p,SOK} - K_{p,MB})/K_{p,MB}$ is evaluated, and the parameter space is classified into zone A, $|\Delta| < 2\%$, in which the planar-surface error is below the practical uncertainty of determining φ itself; zone B, $2\% \le |\Delta| < 5\%$, comparable to the margins implied by partial safety factors; zone C, $|\Delta| \ge 5\%$; and zone D, the degenerate region without a closed-form prediction. The thresholds are identical to those of the active study [25], so that the two maps are directly comparable. Interactive web applications through which the complete parameter space can be explored are provided as supplementary material.

Findings/Discussion

Equivalence of the closed form and the numerical wedge optimum

Over all 45 948 grid cells at which the closed form is defined, expression (1) and the direct numerical minimization of the constrained trial wedge (4) agree to within 10^{-10} % — machine precision (maximum relative deviation $9.9 \cdot 10^{-11}$ %). No parameter combination was found within the physical domain at which the constrained minimum falls on a boundary of the admissible fan (β, ρ_{sing}) rather than at the interior stationary point; the closed form and the constrained numerical optimum are therefore computationally interchangeable, and the breakdown of the Müller-Breslau solution occurs exclusively on the degeneracy locus, not inside the domain. This equivalence is the key that unlocks the remainder of the paper: since the closed form is an exact evaluation of the planar-wedge model, any difference between it and a rigorous solution measures the planar-surface assumption alone. The behaviour of K_p over the (β, δ) plane for successive wall inclinations is shown in Figure 2, in which the degeneracy locus appears as the straight line $\delta = 90° + \alpha - \beta - \varphi$; the assembled three-parameter function $K_p(\alpha, \beta, \delta)$ can be explored in the interactive applications provided as supplementary material.

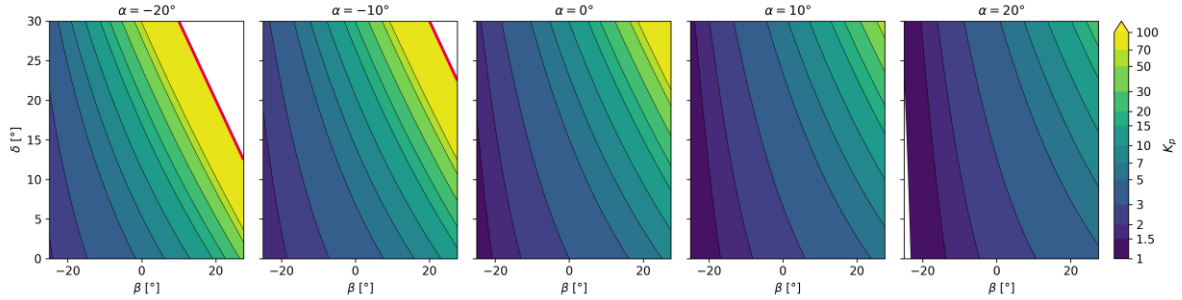


Figure 2. Müller–Breslau coefficient $K_p(\beta, \delta)$ at constant wall inclination α (example shown for φ = 30°), with the degeneracy locus φ + δ + β − α = 90° (red line) and the slope-stability boundary β = φ (dashed) marked.

The singular direction, the critical plane, and the degeneracy $K_p \to \infty$ The location of the degeneracy admits an exact characterization. Substituting the singular direction (5) into

elementary trigonometric identities yields

$$\sin(\varphi + \delta)\cdot\sin(\varphi + \beta) - \cos(\alpha - \delta)\cdot\cos(\alpha - \beta) = -\cos(\varphi + \alpha)\cdot\cos(\varphi + \delta + \beta - \alpha) \qquad (7)$$

so that the radicand of (1) equals unity exactly when $\cos(\varphi + \delta + \beta - \alpha) = 0$, i.e. on the locus $\varphi + \delta + \beta - \alpha = 90°$ (the factor $\cos(\varphi + \alpha)$ does not vanish in the physical domain). On the same locus, $\rho_{sing} = \beta$: the singular direction coincides with the backfill surface, and the admissible fan of trial planes (β, ρ_{sing}) closes to zero width. The divergence of the closed form and the disappearance of the wedge mechanism are therefore one and the same event — a coincidence with no counterpart in the active case, where the coefficient remains finite while the wedge merely grows unbounded at $\beta \to \varphi$. Identity (7) follows in three lines from the product-to-sum and sum-to-product expansions and was additionally verified numerically to machine precision. Near the locus the divergence follows the asymptotic law $K_p \propto \varepsilon^{-2}$, with

$$\sin^2\varepsilon \cdot K_p \to 4\cdot\cos(\alpha - \delta)\cdot\cos^2(\alpha - \beta) / \cos^2\alpha \quad as \quad \varepsilon \to 0 \qquad (8)$$

where $\varepsilon = 90° - (\varphi + \delta + \beta - \alpha)$ is the margin to the locus; the margin will prove to be the single parameter that organizes the entire error landscape. Figure 3 maps the critical plane inclination $\rho cr(\beta, \delta)$: as the locus is approached the fan narrows, ρcr is driven toward the lower admissibility bound β, and for $\beta < 0$ the critical plane dips below the horizontal, as noted in the Methodology. Beyond the locus lies the degenerate zone D — 17.4% of the physically admissible grid — in which the formula yields no prediction at all while the exact resistance remains finite: the characteristics solver converged in 9 645 of its 9 646 cells (the single failure, $\varphi = 26°$, $\alpha = -25°$, $\beta = 22.5°$, $\delta = 2\varphi/3$, combines a backfill slope within 3.5° of the natural-slope limit with the strongest overhang), with coefficients between 11.3 and 5 300 (median 81.4). At $\varphi = 50°$, $\alpha = \beta = 0$, $\delta = \varphi$, for instance, the closed form has already diverged while the rigorous coefficient is 77.8 — and, as shown below, the exact value there is provably confined to the interval [50.5, 89.7] by the two bounds.

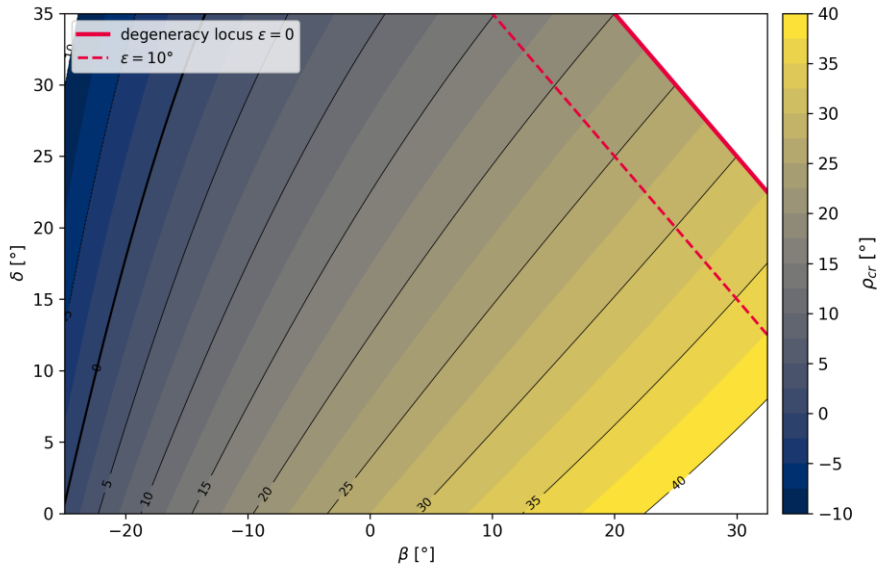


Figure 3. Critical failure-plane angle $\rho cr(\beta, \delta)$ from the numerical wedge minimization (example shown for $\varphi = 35°$, $\alpha = 0°$). The full red line is the degeneracy locus $\varepsilon = 0$; the dashed red line marks the practical proximity contour $\varepsilon = 10°$.

Validation by rigorous bracketing

Table 1 assembles, for the vertical wall with horizontal backfill, the four solutions available in this study: the Lancellotta lower bound (6), the method of characteristics, the rotational log-spiral upper bound, and the Müller-Breslau closed form. Three observations follow. First, at $\delta = 0$, all four coincide with the Rankine value to four digits — the planar surface is then exact, and the agreement validates the sign conventions of all implementations simultaneously. Second, the theoretical ordering LB ≤ SOK ≤ LS ≤ MB holds in every row without exception, as it does at every other point verified in this study; the characteristics solution always falls inside the rigorous bracket. Third, the bracket [LB, LS] is narrow where the closed form is accurate and remains moderate (width 15–78% of the characteristic value) even at $\delta = \varphi$, where the closed form has drifted far above it or diverged entirely: at $\varphi = 50°$, $\delta = \varphi$, the exact coefficient is confined to [50.5, 89.7] while the planar theory offers no value at all.

Table 1. Bracketing validation for the vertical wall with horizontal backfill ($\alpha = \beta = 0$): Lancellotta lower bound, method of characteristics, rotational log-spiral upper bound and Müller-Breslau closed form. $\delta = \varphi$ evaluated at $\varphi - 0.05°$; '—' marks the degenerate case without a closed-form value. Direct evaluation at $\delta = \varphi$ exactly yields different values; for $\varphi = 50°$, $\delta = \varphi$ the closed form lies beyond the degeneracy locus, where blind evaluation returns a finite but spurious value.

No.	φ [°]	δ/φ	$K_{p,LB}$ (6)	$K_{p,SOK}$	$K_{p,LS}$	$K_{p,MB}$ (1)
1	20	0	2.040	2.039	2.039	2.040
2	20	1/2	2.515	2.559	2.568	2.635
3	20	1 (φ−0.05°)	2.871	3.043	3.126	3.519
4	30	0	3.000	3.000	3.000	3.000
5	30	1/2	4.439	4.614	4.649	4.977
6	30	1 (φ−0.05°)	5.801	6.543	6.920	10.066
7	40	0	4.599	4.599	4.599	4.599
8	40	1/2	8.916	9.667	9.815	11.771
9	40	1 (φ−0.05°)	14.382	18.112	19.981	91.704
10	45	0	5.828	5.828	5.828	5.828
11	45	1/2	13.602	15.281	15.615	21.379
12	45	1 (φ−0.05°)	25.449	34.897	39.412	$3.72 \cdot 10^6$
13	50	0	7.549	7.549	7.548	7.549
14	50	1/2	22.292	26.388	27.217	49.025
15	50	1 (φ−0.05°)	50.482	77.808	89.716	—

Planar-surface error across the parameter space

Table 2 gives the median of the relative difference $\Delta = (K_{p,SOK} - K_{p,MB})/K_{p,MB}$ over the (α, β) plane for each combination of φ and δ/φ; the median is reported because the distribution is heavy-

tailed toward the degeneracy locus, so that the mean would be dominated by the divergent cells; the tail is characterized separately below. Two observations organize the error landscape. First, the difference is negative in 99.6% of all cells (maximum positive value +0.13%, within the numerical noise of the comparison): the method of characteristics yields the smaller coefficient, so the planar assumption errs on the unsafe side for passive resistance essentially everywhere — the exact mirror image of the active case, and with far larger magnitudes. (One qualified region exists: for $\delta = 0$ and $\alpha \geq +10°$ the finite-element verification reported below shows the planar mechanism to be exact and the slip-line construction conservative, so the small differences there overstate the planar error; the $\delta = \varphi$ medians that dominate the practical conclusions are unaffected.) The overall median is −10.7%; the median at full wall friction $\delta = \varphi$ is −33.6%, corresponding to a median overestimation factor $K_{p,MB}/K_{p,SOK}$ of 1.51, with the 90th percentile of that factor at 13 and, in the band adjoining the locus ($0 < \varepsilon \leq 2°$), values diverging without bound (median Δ there: −99.6%). At the representative points $\varphi = 20, 30, 40°$ ($\alpha = \beta = 0$, $\delta = \varphi$) the overestimation factors are 1.16, 1.54 and 5.06 respectively, and at $\varphi = 45°$ the closed form has left the physically meaningful range altogether.

Second, no single input parameter governs the error. The medians of Table 2 grow with δ/φ (from −6.0% to −33.6% over the pooled grid) — but they grow comparably with the wall inclination (from −5.1% at $\alpha = +25°$ to −36.6% at $\alpha = -25°$), with the backfill slope, and with φ. All four trends collapse onto one when the error is plotted against the margin $\varepsilon = 90° - (\varphi + \delta + \beta - \alpha)$ to the degeneracy locus, as summarized later in Figure 10a. How strongly ε governs the error can be stated in two ways. First, correlation: over the whole grid the Spearman rank correlation (a measure of monotone association) between |Δ| and ε is −0.83, while no individual parameter exceeds 0.48 in absolute value (δ/φ: 0.27; α: −0.29; β: 0.48; φ: 0.22) — the error follows the combined margin, not any single angle. Second, the trend itself: the typical (median) error decreases steadily as the margin grows — from essentially 100% for $\varepsilon \leq 2°$, through 52% at $\varepsilon = 15$–$20°$, 13.5% at $\varepsilon = 30$–$40°$ and 4% at $\varepsilon = 40$–$50°$, to about 2% beyond $\varepsilon = 50°$ — and within any given ε-band the spread between cells is small compared with this overall fall. The margin to the degeneracy — not the wall friction as such — is the governing parameter of the passive planar-surface error, the structural counterpart of the wall-inclination dominance found in the active case [25]. It also yields a one-line screening rule for practice: the closed form should not be trusted beyond the few-percent level unless ε exceeds roughly 45–50°.

Because the largest differences occur where any single numerical method might be suspected of degradation, the characteristics solution was cross-checked at control points spanning the parameter domain, including inclined walls and sloping backfill (Table 3), and along the full wall-friction range $0 \leq \delta \leq \varphi$ at fixed φ (Figure 4).

Table 2. Median relative difference Δ [%] between the method of characteristics and the Müller-Breslau solution, over all wall inclinations and backfill slopes of the grid. Negative values: the closed form overestimates the passive resistance. In the $\delta/\varphi = 0$ column a part of the difference at $\alpha > 0$ reflects conservatism of the slip-line construction rather than planar-surface error (family F1 of the finite-element verification).

Independent verification: bounds, Kérisel-Absi tables and finite-element limit analysis

φ [°]	δ/φ = 0	1/6	1/3	1/2	2/3	5/6	1
20	−2.5	−2.6	−3.0	−3.5	−5.4	−8.6	−12.7
25	−3.6	−4.0	−4.4	−5.3	−8.8	−13.8	−20.6
30	−5.0	−5.5	−6.4	−7.5	−13.7	−20.8	−30.4
35	−6.1	−6.9	−8.4	−12.7	−21.0	−31.2	−43.3
40	−7.6	−8.7	−10.8	−17.5	−29.1	−39.8	−53.9
45	−9.0	−10.1	−12.3	−21.1	−32.1	−43.2	−60.0
50	−10.1	−11.6	−14.7	−22.9	−36.0	−49.6	−64.5

Table 3. Three-method comparison at control points spanning the parameter domain and the full range of the planar-surface error: Müller-Breslau (planar mechanism), rotational log-spiral upper bound (LS), and method of characteristics (SOK). δ = φ evaluated at φ − 0.05°; '—' marks degenerate or physically meaningless closed-form values.

φ [°]	α [°]	β [°]	δ [°]	$K_{p,MB}$	$K_{p,LS}$	$K_{p,SOK}$	(MB−SOK)/SOK [%]	(LS−SOK)/SOK [%]
30	0	0	15	4.977	4.649	4.614	+7.8	+0.8
20	0	0	20	3.519	3.126	3.043	+15.7	+2.7
30	10	10	20	7.162	5.996	5.936	+20.6	+1.0
40	0	0	20	11.771	9.815	9.667	+21.8	+1.5
30	−10	0	20	9.663	7.066	6.896	+40.1	+2.5
30	0	0	30	10.066	6.920	6.543	+53.8	+5.8
50	0	0	25	49.025	27.217	26.388	+85.8	+3.1
40	0	0	40	91.704	19.981	18.112	+406	+10.3
40	−15	0	26.7	128.982	23.991	22.802	+466	+5.2
45	0	10	30	426.155	36.541	35.006	+1117	+4.4
45	0	0	45	$3.72 \cdot 10^6$	39.412	34.897	—	+12.9
50	0	0	50	—	89.716	77.808	—	+15.3
30	−20	−25	20	2.891	2.872	2.850	+1.5	+0.8

The kinematic bound exceeds the characteristics solution by 0.8–15% — a wider one-sided gap than the 0.2–2% observed in the active case, as expected for the passive rotational mechanism — but the ordering never inverts, and the Lancellotta bound encloses the solution from below wherever it applies. The decisive observation is method-independent: at φ = 40°, α = β = 0, δ = φ, the log-spiral upper bound alone is 19.98 against the closed-form 91.70 — the planar solution exceeds a rigorous upper bound on the exact coefficient by a factor of 4.6, so its overestimation at high wall friction is established without any reference to the slip-line solver. At the anchor point φ = 30°, δ → φ, the characteristics value 6.54 agrees with the Kérisel-Absi tables (≈ 6.55) to 0.2%, while the closed form gives 10.07.

The finite-element limit analysis programme provides the sharpest and most extensive test. All 660 analyses (330 lower and 330 upper bounds) converged; the bound gap UB − LB, relative to the bracket mean, had a median of 0.69%, a 95th percentile of 2.19% and a maximum of 8.73% (φ

= 45°, δ = φ). With a ±1% numerical tolerance on the bounds, the slip-line coefficient fell inside the FELA bracket in 305 of the 330 cases (92.4%), including 14 of the 17 combinations beyond the degeneracy locus — the region where the Müller-Breslau expression offers no prediction whatever, and where the rigorous bracket now confirms the slip-line coefficients directly (Figure 5). The 25 exceptions form two sharply defined families, mapped in Figure 7, and both admit a complete explanation.

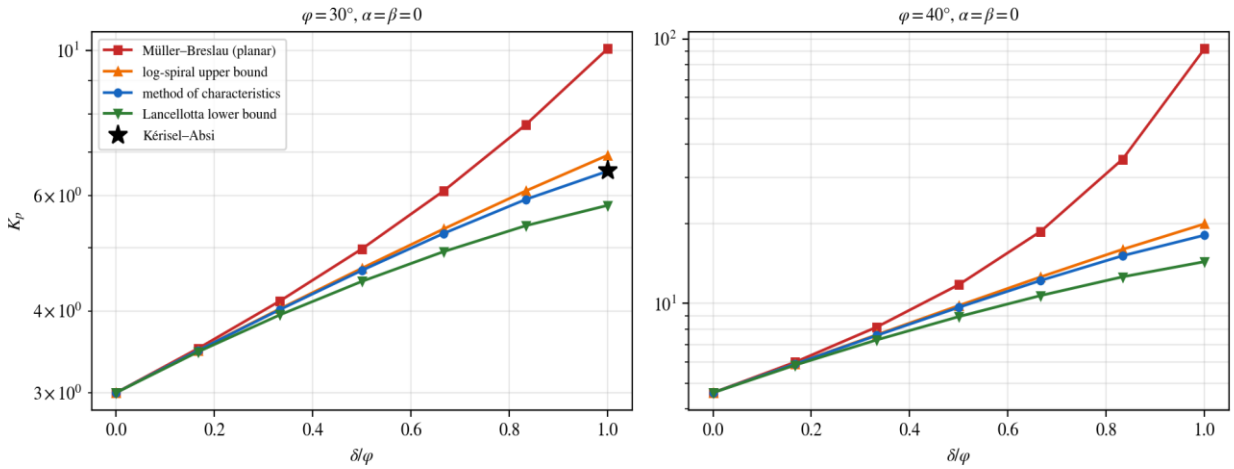


Figure 4. Wall-friction sweeps at α = β = 0 for φ = 30° and φ = 40° (logarithmic scale): Müller-Breslau closed form, rotational log-spiral upper bound, method of characteristics, and Lancellotta lower bound; the star marks the Kérisel-Absi value at φ = 30°, δ = φ. The exact coefficient lies between the green and orange curves; the red curve leaves the bracket as δ grows.

The first family, F1 (21 cases), is the smooth wall inclined away from the backfill: δ = 0, α = +10…+25°. There the planar Müller-Breslau mechanism is the exact solution — in all 21 cases the closed-form coefficient lies inside the FELA bracket, within 0.4% of its midpoint — while the present slip-line implementation (the stress-jump construction, branch B) is conservative by 1.2% (φ = 20°, α = +15°) up to 8.1% (φ = 45°, α = +25°), the deficit growing systematically with φ and α (Figure 6). This region is therefore not a limitation of the closed form but of the slip-line branch-B construction, and it qualifies Table 2 as noted there: in the δ = 0 column at α > 0 a part of the tabulated difference reflects slip-line conservatism rather than planar-surface error. The practical conclusions of this study, which are driven by the high-friction range, are unaffected.

The second family, F2 (4 cases), is the rough wall with strong overhang: δ = φ, α = −25°, φ ≥ 30°. There the FELA collapse load of a translating rigid wall exceeds the slip-line value by 1.3–5.3%. Integration of the interface tractions shows the cause: under purely horizontal translation the interface cannot mobilise the full δ near the heel, where the pressure peaks, so the resultant is less inclined than assumed (integrated $\delta_{mob} \approx 33–37°$ instead of 45° at φ = 45°) and the horizontal component — hypersensitive to δ_{mob} when |α − δ| approaches 70° (a change of 1° alters P_h by about 1.6%) — rises above the classical value. The classical coefficients themselves are confirmed independently in this region by the Kérisel-Absi tables; the discrepancy quantifies the kinematic

reachability of the classical boundary condition, not an error of either method.

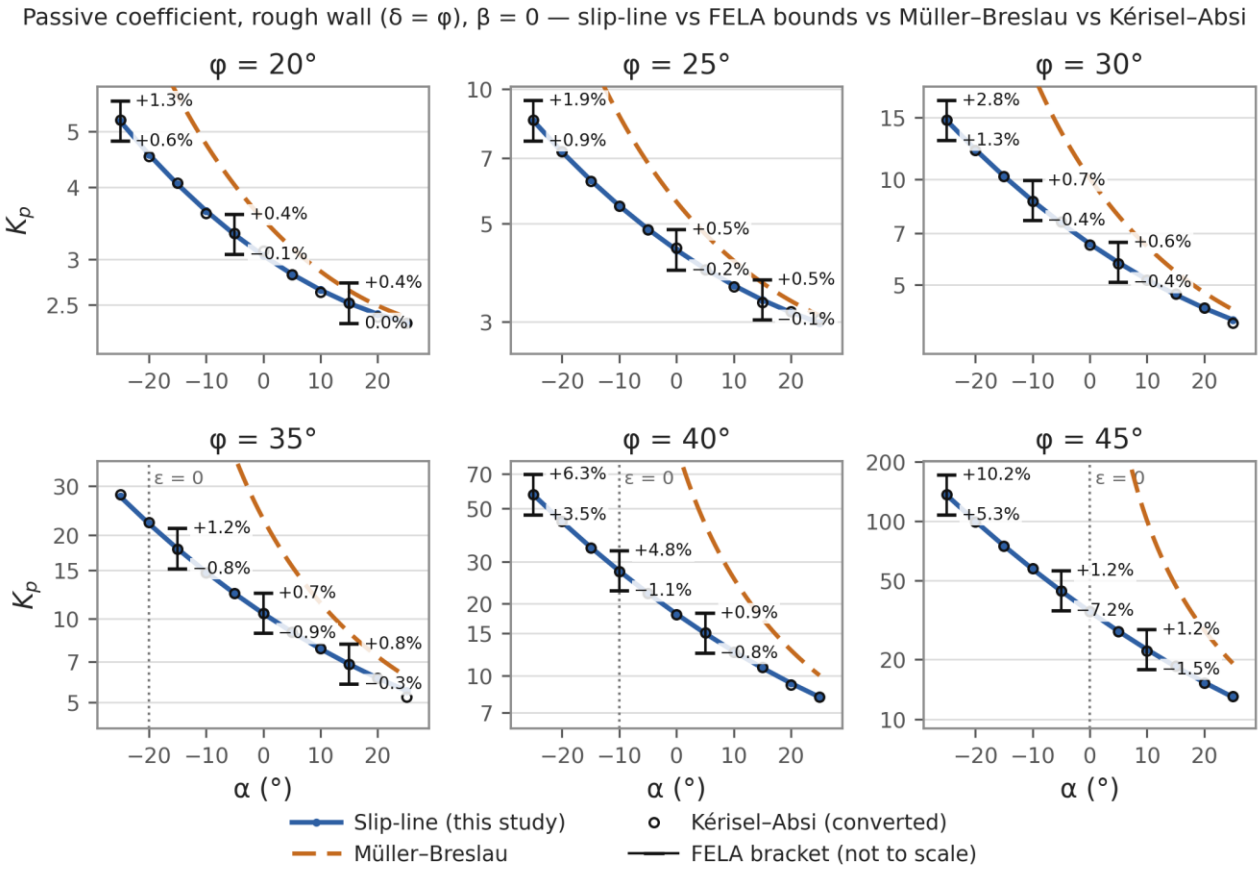


Figure 5. Rough wall (δ = φ, β = 0): slip-line solution, rigorous FELA bracket (markers not to scale — the percentages give the actual deviations of the lower and upper bound from the slip-line value), Müller-Breslau closed form and converted Kérisel-Absi values (circles); the dotted vertical line marks the degeneracy locus ε = 0. Beyond the locus the closed form yields no prediction, while the slip-line coefficient remains finite and inside the bracket.

The comparison with the Kérisel-Absi tables [7] was accordingly extended from the single anchor point to the entire δ = φ branch. With the normalisation conversion $K_p = K_{p,K\text{-}A}/\cos^2\lambda$, λ ≡ α (their coefficient acts on the face length), the 66 tabulated combinations (φ = 20–45°, α = −25…+25°, table δ/φ′ = −1.00, β = 0) agree with the slip-line coefficients with a median difference of −0.1% and within ±2% everywhere except one reading (φ = 35°, α = +25°: −5.2%, at the two-significant-digit resolution of the table); at φ = 45° the agreement is within ±1.5% at all eleven inclinations (e.g. α = −25°: 136.4 against the converted 135.5; α = 0: 35.0 against 34.9). The active-branch counterpart of the same comparison (90 tabulated combinations, δ/φ ∈ {0, 2/3, 1}) agrees to a median of −0.2%. Two fully independent methods thus confirm the present solver on both limit states — in particular across the whole region where the Müller-Breslau passive expression is undefined.

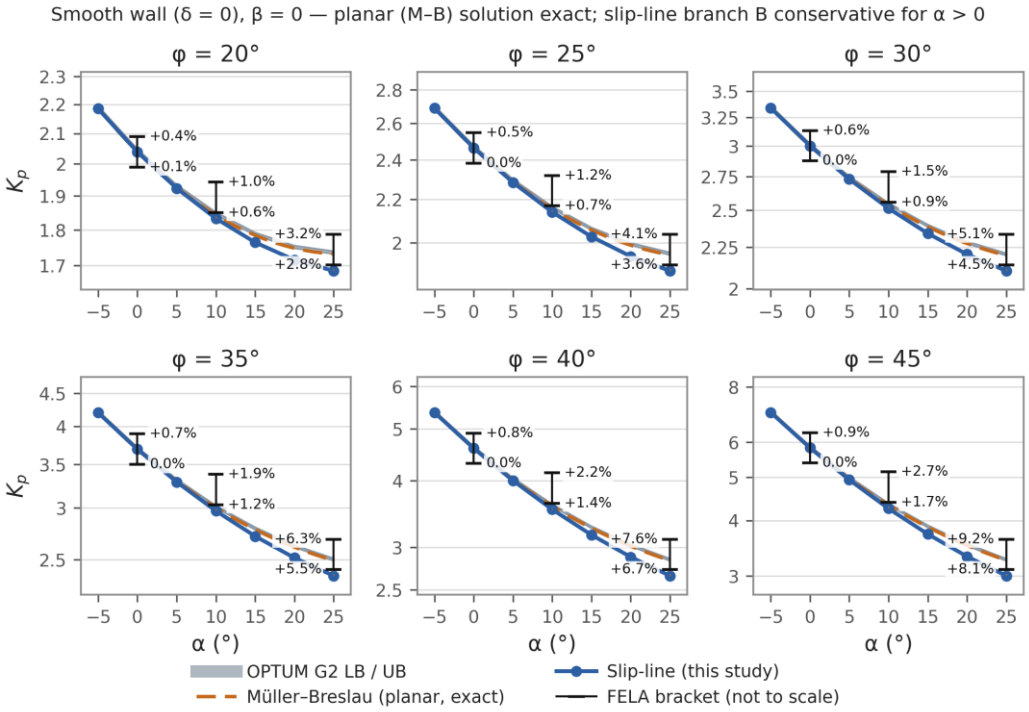


Figure 6. Smooth wall (δ = 0, β = 0): the planar Müller-Breslau mechanism is exact — it lies inside the FELA band throughout — while the slip-line branch-B construction becomes conservative for α > 0 (family F1): at α = +25° the entire FELA bracket lies above the slip-line value. The view is restricted to α ≥ −5°; for smaller α the solutions are indistinguishable at this scale. Bracket markers are not to scale; the percentages give the actual deviations from the slip-line value.

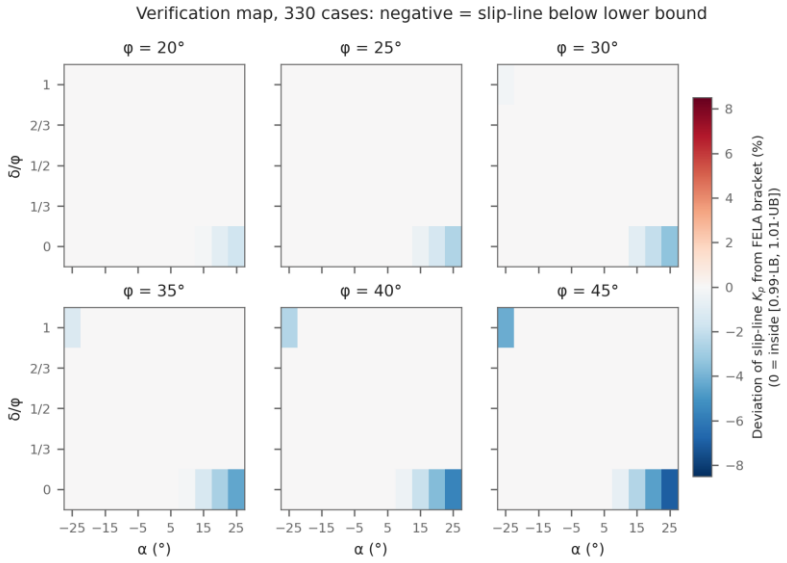


Figure 7. Verification map of all 330 FELA cases: deviation of the slip-line coefficient from the rigorous bracket (0 = inside the bracket at ±1% tolerance). The deviation families F1 (slip-line branch-B conservatism, δ = 0, α ≥ +10°) and F2 (incomplete interface mobilisation, δ = φ, α = −25°) are the only non-zero regions.

Behaviour beyond the degeneracy locus: sensitivity to the sub-heel boundary

Beyond the degeneracy locus $\varphi + \delta + \beta - \alpha = 90°$, the collapse mechanism no longer remains confined between the wall face and the free surface: it dips below the plane of the wall heel and, if soil is present there, engages material behind the plane of the wall (Figure 8). For the extreme cell $\varphi = 45°$, $\delta = \varphi$, $\alpha = -25°$ ($\varepsilon = -25°$) the horizontal collapse load of the translating wall is 490–512 kN/m when the region below the heel is idealised as a smooth rigid boundary — the closest analogue of the classical assumption — but 876–924 kN/m when a soil continuum is modelled below and behind the heel: almost twice the classical $P_h = 464.6$ kN/m computed from the slip-line coefficient, even though the magnitude of the total resultant remains close to the classical value. In this region the passive resistance therefore ceases to be a property of (φ, α, β, δ) alone: it depends decisively on conditions below the heel that the classical framework leaves unspecified. Together with the incomplete wall-friction mobilisation of family F2, this constitutes a practical limitation of the classical passive-pressure framework that is distinct from, and additional to, the formal degeneracy of the Müller-Breslau expression. These observations delimit, rather than resolve, the sub-heel problem: the present study documents the sensitivity and identifies its mechanism, while its systematic quantification — the roles of wall thickness, base contact and the shear transmissible across the wall-soil interface — is deliberately left outside the scope of this paper and is the subject of a dedicated follow-up study. All coefficients reported here for the degenerate zone therefore refer to the classical configuration, with a rigid, smooth boundary at heel level.

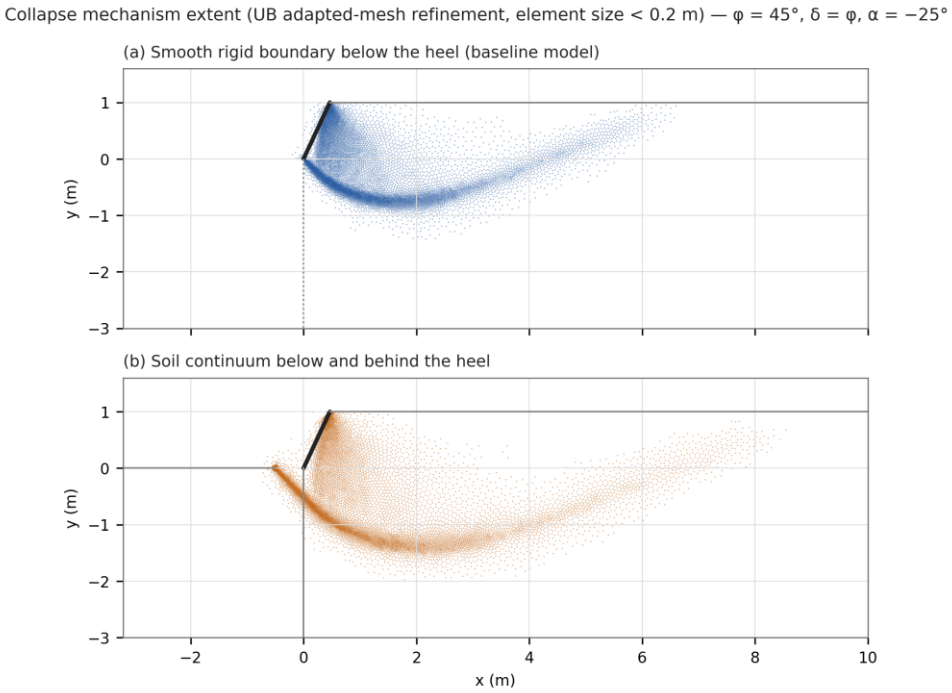


Figure 8. Collapse-mechanism extent for $\varphi = 45°$, $\delta = \varphi$, $\alpha = -25°$, reconstructed from the adapted-mesh refinement: (a) smooth rigid boundary below the heel (the analogue of the classical assumption); (b) soil continuum below and behind the heel. In case (b) the mechanism extends about 1.6 m behind the plane of the wall (H = 1 m) and the horizontal collapse load nearly doubles.

Applicability maps

The findings are condensed into the applicability maps of Figure 9, which classify the (β, δ) plane for each wall inclination into zone A (|Δ| < 2%), zone B (2–5%), zone C (≥ 5%), the degenerate zone D without a closed-form prediction, and the excluded region |β| ≥ φ, in which a cohesionless slope would exceed its natural angle of repose. The proportions contrast sharply with the active-case maps [25]. Over the whole grid, zone A occupies 19.5% of the physically admissible cells, zone B 10.4%, zone C 52.7% and zone D 17.4%. The safe zone is largest at low friction angle and positive wall inclination — 53% of the plane at φ = 20°, α = +25° — and shrinks monotonically with growing φ and decreasing α, to 9.5% at φ = 50°, α = 0° and 2.4% at φ = 50°, α = −25° (Figure 10b); in the active case the corresponding shares for near-vertical walls were 68–84%. The practical reading is direct: the passive Müller-Breslau formula is trustworthy only in the low-friction, low-slope corner of the parameter space, far from the degeneracy locus; for the parameter ranges in which passive resistance actually matters in design — dense soils, rough interfaces — a curved-surface solution is required, and for a conservative closed-form alternative the Lancellotta bound (6) is available at no computational cost.

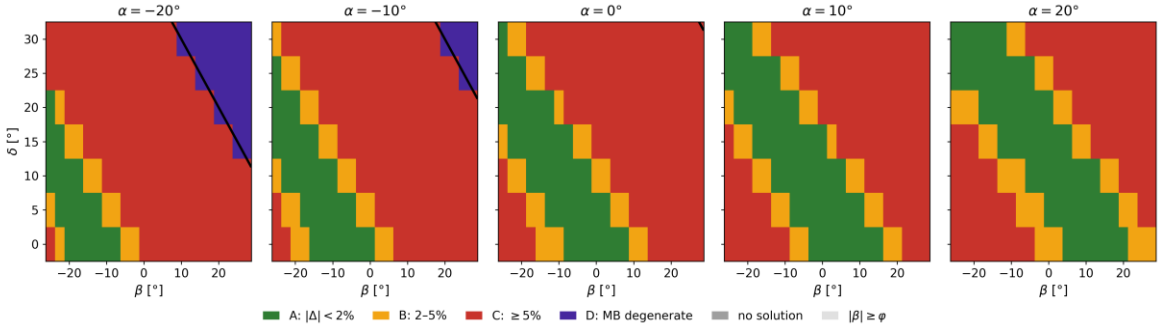


Figure 9. Applicability map of the passive Müller-Breslau formula (example shown for φ = 30°): zone A (|Δ| < 2%), zone B (2–5%), zone C (≥ 5%), zone D (degenerate — no closed-form prediction), grey — unresolved cells, light grey — inadmissible |β| ≥ φ. The black line is the degeneracy locus φ + δ + β − α = 90°.

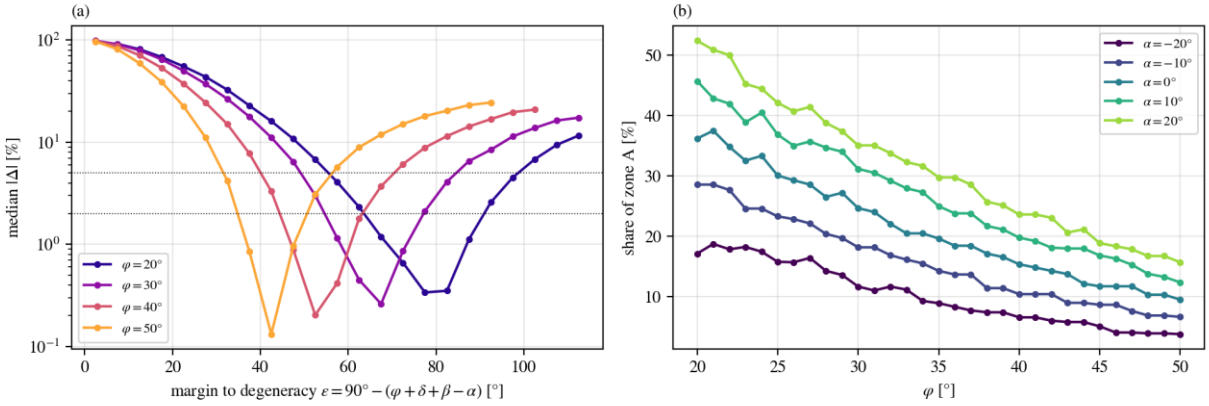


Figure 10. Summary over the friction-angle range: (a) median planar-surface error |Δ| as a function of the margin ε to the degeneracy locus, collapsing the α, β and δ dependences onto one curve per φ (logarithmic scale; dotted lines at 2% and 5%); (b) share of the safe-application zone

A as a function of φ for each wall inclination α. At very large margins — reachable only for low δ, strongly descending backfill and α > 0 — the median difference grows again, now on the conservative side (the branch-B region qualified at Table 2).

The results admit a transparent interpretation in the framework of the limit theorems [8]. The Coulomb wedge is the simplest kinematic mechanism for the passive problem, and its exact evaluation — the Müller-Breslau closed form — is consequently a mechanism-based estimate approaching the true resistance from above; the rotational log-spiral mechanism is a better member of the same kinematic family and lies between; the Lancellotta stress field approaches from below; and the method of characteristics, constructing a complete stress solution, falls inside the bracket. The ordering LB ≤ SOK ≤ LS ≤ MB observed at every verified point of Tables 1 and 3 is exactly the prediction of the theorems, with every inequality reversed relative to the active case. Within this picture, the machine-precision agreement between the closed form and the constrained numerical wedge is not a mechanical result but an essential verification: it certifies that the entire difference reported in Tables 2–3 belongs to the failure-surface geometry, and not to the algebra or numerics of the wedge model.

The governing role of the margin ε has a simple geometric explanation. The admissible fan of trial planes is (β, ρ_{sing}), and its angular width is precisely ε. When the fan is wide, the planar optimum sits far from the singular direction, the true slip surface is gently curved, and the wedge estimate is adequate. As the fan narrows — whether by increasing δ or β, by decreasing α, or by increasing φ, all of which enter ε with equal weight — the critical plane is displaced toward the singular direction, along which the wall and slip-plane reactions are parallel and the planar model can balance the wedge only at rapidly growing force magnitudes; the true mechanism escapes this geometric trap by curving, which the planar surface cannot do, and the error grows without bound as ε → 0. This also explains why no individual parameter dominates: the error is a function of the aggregate φ + δ + β − α far more than of its components. In the active case, the corresponding fan is wide throughout the practical domain, the singular direction is reached only at the boundary of the practical domain, and the error structure is instead governed by the wall inclination [25]; the two papers thus identify two different geometric mechanisms by which the same planar idealization fails.

The practical implications are direct, and they are more severe than in the active case because passive resistance is a stabilizing quantity: overestimating it reduces real safety margins wherever passive earth pressure is relied upon — embedded retaining walls below the excavation level, anchor blocks and deadman anchors, thrust blocks, bridge abutments, and the toe resistance of gravity structures. In the parameter ranges typical of such applications (dense granular soils, φ ≥ 35°, cast-against or rough interfaces with δ ≥ 2φ/3), Table 2 shows median overestimations of 20–50% and the maps of Figure 9 place virtually the whole region in zones C and D. Three graded recommendations follow. First, the closed form may be retained where the margin ε exceeds roughly 45–50°, which in practice confines its use to low friction angles and low wall friction, with unfavourable geometries (strongly negative α, steep backfill) excluded by an explicit check of the margin ε. Second, wherever ε is smaller, a curved-surface solution — the Kérisel-Absi tables [7], a

characteristics or finite-element limit analysis computation [13], or the log-spiral mechanism — should replace it; the present maps quantify the error committed if it is not. Third, when a closed-form expression is wanted, the Lancellotta bound (6) is itself one; it is rigorous, and it errs on the safe side by construction; for the vertical rough wall it reproduces the exact coefficient within 11–35% from below over the whole friction range examined here, against unbounded overestimation from above by the wedge formula. The degenerate zone D deserves separate emphasis: it is not an exotic corner but 17.4% of the physical grid; it includes routinely specified combinations such as $\varphi = 50°$, $\delta = \varphi$ on a vertical wall, and within it the formula produces either absurdly large values just before the locus or nothing at all beyond it — while the exact coefficient is finite, computable, and in this study bracketed to within tens of percent.

Two numerical by-products deserve emphasis because they affect anyone re-implementing the passive wedge optimization, including in teaching. First, since the objective function of the minimization, $K_p(\rho)$ in (4), is defined only on the fan (β, ρ_{sing}) and grows without bound at both ends, bracketing scalar optimizers silently fail on the infinite plateau; a dense constrained scan is required. Second, the search interval must be anchored at β, not at zero: for $\beta < 0$ near the locus, the critical plane dips below the horizontal, and a search over $\rho > 0$ returns values grossly in error (232% in the example quoted in the Methodology) while appearing perfectly converged. Both failure modes produce plausible-looking coefficients and neither condition is stated in the standard derivations [2], [3]. The margin ε, computable in one line, is the natural guard: implementations should refuse, or at least flag, evaluations at small ε — which is precisely where naive optimizations misbehave and where the formula, even correctly evaluated, is furthest from the truth.

The study is limited to a dry, homogeneous, cohesionless backfill under static conditions, to resultant forces rather than pressure distributions, and to the associated flow rule implicit in both limit analysis and the method of characteristics; for the strongly non-associated behaviour of dense sands the rigorous coefficients themselves are known to decrease further, so the planar-surface error quantified here is, if anything, a lower estimate of the total unconservatism. The displacement required to mobilize full passive resistance — many times that of the active state — is outside the scope of limit theory and must be checked separately in serviceability terms. The extension to cohesive backfill via the theorem of corresponding states is exact only for smooth walls, so the present error maps cannot simply be transformed to c–φ soil; the seismic extension through the Mononobe-Okabe framework, in which the passive coefficient is the Müller-Breslau solution under rotated gravity, suggests that the ε-governed structure identified here transfers directly, with the seismic rotation acting as an additional erosion of the margin — both extensions, together with the surcharge case needed for direct comparison with Sokolovski's own tables, are left for future work. Finally, beyond the degeneracy locus the classical problem itself becomes incompletely posed: the finite-element analyses show the collapse mechanism extending below the wall heel and behind the plane of the wall, so the mobilisable resistance depends on sub-heel conditions that no coefficient of (φ, α, β, δ) can capture; the coefficients reported here for that

region are those of the classical boundary-value problem, in which the collapse mechanism is implicitly confined above heel level; in the finite-element verification this configuration was approximated by a rigid, smooth boundary at the heel plane.

Conclusion

This paper mapped the validity domain of the Müller-Breslau passive earth pressure coefficient and quantified the error of its planar failure-surface assumption over the parameter space $\varphi = 20–50°$, $|\alpha| \le 25°$, $-25° \le \beta < \varphi$, $0 \le \delta \le \varphi$. The main findings are as follows.

1. Direct numerical minimization of the Coulomb trial wedge, with the admissibility conditions $\beta < \rho < \rho_{sing} = 90° - \varphi - \delta + \alpha$ imposed, reproduces the closed form to machine precision (below 10^{-10} %) over all 45 948 parameter combinations at which the formula is defined; the difference between the Müller-Breslau solution and the method of characteristics is therefore a pure measure of the planar failure-surface error.

2. The degeneracy of the closed form is characterized analytically: the radicand of the formula reaches unity exactly on the locus $\varphi + \delta + \beta - \alpha = 90°$, on which the singular direction coincides with the backfill surface and the admissible fan of trial planes closes — the divergence of the formula and the disappearance of the wedge mechanism are the same event, with the asymptotic law $K_p \propto \varepsilon^{-2}$ in the margin $\varepsilon = 90° - (\varphi + \delta + \beta - \alpha)$. Beyond the locus (17.4% of the physical grid), the formula yields no prediction, although the exact resistance is finite: the characteristics solver converged in 9 645 of 9 646 such cells, with coefficients up to 5 300.

3. The planar-surface error lies on the unsafe side in 99.6% of the grid and is governed primarily by the margin ε rather than by any individual parameter (Spearman −0.83 against at most 0.48): the median overestimation grows from about 2% for $\varepsilon > 50°$ through 13.5% at $\varepsilon = 30–40°$ and 52% at $\varepsilon = 15–20°$ to divergence at the locus; at full wall friction $\delta = \varphi$ the median overestimation factor is 1.51, reaching 1.16, 1.54 and 5.06 at $\varphi = 20, 30, 40°$ on the vertical wall and unbounded values beyond.

4. The characteristics solution is enclosed at every verified point in the rigorous sandwich $K_{p,LB} \le K_{p,SOK} \le K_{p,LS} \le K_{p,MB}$ formed by the Lancellotta lower bound and the rotational log-spiral upper bound, reproduces the Rankine limit to 0.04%, respects all 35 upper-bound coefficients of Soubra, and agrees with the Kérisel-Absi anchor value at $\varphi = 30°$, $\delta \to \varphi$ to 0.2%. The overestimation by the closed form is established independently of the solver: at $\varphi = 40°$, $\delta = \varphi$ the planar value exceeds the rigorous upper bound alone by the factor 4.6. Finite-element limit analysis extends this verification: over a 330-case matrix the slip-line coefficient falls inside the rigorous LB–UB bracket in 92.4% of cases — including 14 of the 17 combinations beyond the degeneracy locus — and the residual deviations are confined to two explained families: conservatism of the slip-line stress-jump construction for the smooth wall inclined away from the backfill (where the planar solution is exact), and incomplete interface mobilisation for the strongly overhanging rough wall. Across the whole $\delta = \varphi$ branch, the converted Kérisel-Absi values agree with the slip-line coefficients to a median of 0.1%. Beyond the locus, additionally, the finite-element analyses show the collapse mechanism extending below the wall heel, so the mobilisable resistance becomes sensitive to sub-heel conditions outside the classical framework — a limitation documented here and left to a dedicated follow-up study.

5. Applicability maps classify the parameter space into a safe-application zone ($|\Delta| < 2\%$; 19.5% of the physical grid overall, from 53% at $\varphi = 20°$, $\alpha = +25°$ down to 2.4% at $\varphi = 50°$, $\alpha = -25°$), a caution zone (10.4%), a significant-error zone (52.7%) and the degenerate zone (17.4%).

For design practice, the passive Müller-Breslau formula should be restricted to the large-margin region $\varepsilon \gtrsim 45–50°$; elsewhere a curved-surface solution is required, and where a closed form is wanted, the Lancellotta lower bound offers a rigorous conservative substitute. The interactive applications accompanying this paper allow the complete parameter space to be explored directly.

The contribution of the authors

Aleksej Aniskin: conceptualization, methodology, software, validation, formal analysis, visualization, writing — original draft.

Khrystyna Moskalova: writing — review and editing.

Matija Orešković: writing — review and editing.

Andjelko Crnoja: writing — review and editing.

References

1. Coulomb C.A. Essai sur une application des règles de maximis & minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture // Mémoires de Mathématique & de Physique, Académie Royale des Sciences. — 1776. — Vol. 7. — P. 343–382.

2. Müller-Breslau H. Erddruck auf Stützmauern. — Stuttgart: Alfred Kröner Verlag, 1906.

3. Terzaghi K. Theoretical Soil Mechanics. — New York: John Wiley & Sons, 1943.

4. Clayton C.R.I., Woods R.I., Bond A.J., Milititsky J. Earth Pressure and Earth-Retaining Structures. 3rd ed. — Boca Raton: CRC Press, 2013.

5. Sokolovski V.V. Statics of Granular Media. — Oxford: Pergamon Press, 1965.

6. Caquot A., Kérisel J. Tables for the Calculation of Passive Pressure, Active Pressure and Bearing Capacity of Foundations. — Paris: Gauthier-Villars, 1948.

7. Kérisel J., Absi E. Active and Passive Earth Pressure Tables. 3rd ed. — Rotterdam: Balkema, 1990.

8. Chen W.F. Limit Analysis and Soil Plasticity. — Amsterdam: Elsevier, 1975.

9. Active and passive earth pressure coefficients by a kinematical approach / A.-H. Soubra, B. Macuh // Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering. — 2002. — Vol. 155, No. 2. — P. 119–131. DOI: 10.1680/geng.2002.155.2.119

10. Chen W.F., Liu X.L. Limit Analysis in Soil Mechanics. — Amsterdam: Elsevier, 1990.

11. Analytical solution of passive earth pressure / R. Lancellotta // Géotechnique. — 2002. — Vol. 52, No. 8. — P. 617–619. DOI: 10.1680/geot.2002.52.8.617

12. An alternative to the Mononobe–Okabe equations for seismic earth pressures / G. Mylonakis, P. Kloukinas, C. Papantonopoulos // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2007. — Vol. 27, No. 10. — P. 957–969. DOI: 10.1016/j.soildyn.2007.01.004

13. Geotechnical stability analysis / S.W. Sloan // Géotechnique. — 2013. — Vol. 63, No. 7. — P. 531–571. DOI: 10.1680/geot.12.RL.001

14. Seismic passive earth pressure coefficients using the method of characteristics / J. Kumar, S. Chitikela // Canadian Geotechnical Journal. — 2002. — Vol. 39, No. 2. — P. 463–471. DOI: 10.1139/t01-103

15. Active and passive critical slip fields for cohesionless soils and calculation of lateral earth pressures / D. Zhu, Q. Qian, C. Lee // Géotechnique. — 2001. — Vol. 51, No. 5. — P. 407–423.

16. A generalized slip line solution to the active earth pressure on circular retaining walls /

F.Q. Liu, J.H. Wang // Computers and Geotechnics. — 2008. — Vol. 35, No. 2. — P. 155–164. DOI: 10.1016/j.compgeo.2007.06.002

17. Slip-line solution to active earth pressure on retaining walls / M.X. Peng, J. Chen // Géotechnique. — 2013. — Vol. 63, No. 12. — P. 1008–1019. DOI: 10.1680/geot.11.P.135

18. Seismic lateral earth pressure coefficients for c–φ soils by slip line method / Y.M. Cheng // Computers and Geotechnics. — 2003. — Vol. 30, No. 8. — P. 661–670.

19. Seismic passive earth pressure on an inclined cantilever retaining wall using method of stress characteristics — a new approach / G. Santhoshkumar, P. Ghosh // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2018. — Vol. 107. — P. 77–82. DOI: 10.1016/j.soildyn.2018.01.021

20. General axisymmetric active earth pressure by method of characteristics — theory and numerical formulation / Y.M. Cheng, Y.Y. Hu, W.B. Wei // International Journal of Geomechanics. — 2007. — Vol. 7, No. 1. — P. 1–15. DOI: 10.1061/(ASCE)1532-3641(2007)7:1(1)

21. The effects of the soil-wall adhesion and friction angle on the active lateral earth pressure of circular retaining walls / A. Keshavarz, M. Ebrahimi // International Journal of Civil Engineering. — 2016. — Vol. 14, No. 2. — P. 97–105. DOI: 10.1007/s40999-016-0016-3

22. Active earth pressure of narrow cohesionless backfill on inclined rigid retaining walls rotating about the bottom / Y.J. Lin, F.Q. Chen, J.T. Yang, D. Li // International Journal of Geomechanics. — 2020. — Vol. 20, No. 7. — 04020102. DOI: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001727

23. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects / K.H. Paik, R. Salgado // Géotechnique. — 2003. — Vol. 53, No. 7. — P. 643–653. DOI: 10.1680/geot.2003.53.7.643

24. Static and seismic passive earth pressure coefficients on rigid retaining structures / A.-H. Soubra // Canadian Geotechnical Journal. — 2000. — Vol. 37, No. 2. — P. 463–478. DOI: 10.1139/t99-117

25. The Müller–Breslau active earth pressure coefficient: validity domain and quantification of the planar failure-surface error / A. Aniskin, K. Moskalova, M. Orešković, Sh.Zh. Zharassov./ Bulletin of the Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering. №2 (100), 2026. Architecture & Construction — 2026. — (preprint).

26. Significance of flow rule for the passive earth pressure problem / C. Schmüdderich, F. Tschuchnigg, H.F. Schweiger // Acta Geotechnica. — 2022. — Vol. 17, No. 1. — P. 81–92.

27. OPTUM G2: Analysis, Materials, Examples and Theory Manuals. — Copenhagen: Optum Computational Engineering, 2023.

Availability statement

The parametric-study data (56 364 cells), the validation data, and the computational scripts supporting the conclusions of this study are available from the corresponding author upon reasonable request. The interactive applications are archived on Zenodo: the Sokolovski K_a/K_p slip-line solver (https://doi.org/10.5281/zenodo.22011079) and the interactive 3D visualization of the Müller–Breslau coefficients (https://doi.org/10.5281/zenodo.21839813).

Supplementary materials

Interactive web applications for the exploration of the passive (and active) earth pressure coefficients over the full parameter space are available on Zenodo: the interactive 3D visualization of the Müller–Breslau coefficients K_a/K_p with a synchronized retaining-wall cross-section

(https://doi.org/10.5281/zenodo.21839813) and the Sokolovski K_a/K_p slip-line solver with Müller–Breslau and Coulomb-wedge comparison (https://doi.org/10.5281/zenodo.22011079).

Use of Artificial Intelligence (AI)

Grammarly AI V1.2.290

Information about the authors

Aleksej Aniskin — Assoc. prof., PhD, University North, University Centre Varaždin, Croatia;
Khrystyna Moskalova — Assist. prof., PhD, University North, University Centre Varaždin, Croatia;
Matija Orešković — Assoc. prof., PhD, University North, University Centre Varaždin, Croatia;
Andjelko Crnoja — Assist. prof., PhD, University North, University Centre Varaždin, Croatia;

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Review https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-42-58

Transformative Potential of Artificial Intelligence for Enhancing Efficiency, Labor Productivity and Quality in construction sector in Kazakhstan

D.O. Bazarbayev[1]* , D.K. Zhumadullaev[2] , L.I. Ramatullaeva[2] , S.S. Shukirova[2] , B.T. Uakhitova[3]

[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan,
[2]M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan,
[3]K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan

E mail: [1]bazarbayev_do_1@enu.kz, [2]daulet4403@gmail.com, [2]ramatullaeva_l@mail.ru, [2]shukirova.symbat@gmail.com, [3]buakhitova@zhubanov.edu.kz

Abstract. The construction industry is essential to Kazakhstan's socioeconomic development but faces low labor productivity, project delays, and inefficient supply chains. This review examines the potential of artificial intelligence to improve construction efficiency, labor productivity, and quality control, drawing on international literature and considering its relevance to Kazakhstan. A thematic literature synthesis organizes the discussion around these three areas. The reviewed applications include predictive analytics, scheduling optimization, robotics, building information modelling, and automated defect detection. The synthesis indicates that these technologies can support resource allocation, project coordination, productivity prediction, and more consistent inspection. However, their benefits depend on data quality, digital infrastructure, workforce capabilities, and organizational readiness. The contribution of the review is to connect reported applications with the conditions affecting their transfer to Kazakhstan's construction sector. The findings support context-specific pilot projects, workforce training, and coordinated development of digital capabilities. The proposed directions offer a basis for evaluating AI adoption in construction practice and for further research on implementation under local conditions.

Keywords: Artificial Intelligence, AI integration, construction, efficiency, Kazakhstan.

Received 22.10.2025. Revised 15.09.2026. Accepted 16.09.2026. Available online 30.09.2026

* the corresponding author

Introduction

Construction, as a significant industry, plays an important role in driving social and economic growth and long-term national development. The construction industry worldwide including Kazakhstan has been slow in adopting new methods, and technologies. This sluggishness in adopting digital technologies, and automation is a barrier to productivity improvements [1].

Worldwide it is observed that poor labor productivity throughout the building process is an evident concern, resulting in waste of personnel, material resources, and financial resources; similar concern is observed in Kazakhstan. The construction sector in Kazakhstan is now undergoing a significant transformation, reaching a critical juncture in terms of technical advancements. The government of the Republic of Kazakhstan has taken the initiatives of BIM adoption in 2016 under the umbrella of Technology of Information Modeling of Construction Facilities (TIMCF) The goal of this initiative was to implement the 'Concept' - a 'Roadmap for information modeling technology implementation when designing construction facilities (BIM-technology)' for the periods of 2018-2022. Despite this ambitious initiative, project stakeholders face number of technology and process-related risks and barriers in implementing BIM [2].

The demands for more efficient, cost-effective, and sustainable construction practices have never been sustainable in Kazakhstan. Because building operations contribute significantly to our society's economic well-being, it makes the most sense to implement appropriate construction wise operations in order to improve product performance in Kazakhstan. Construction projects in Kazakhstan face a number of difficulties [3]. In particular the construction sector is characterized by low technological advances, low productivity, minimum automation and computerization [3]. The integration of Lean Reduce operational interruptions 4.0 such as Lean manufacturing tools and digital technologies, can significantly reduce operational interruptions and improve labor productivity. Despite, these practices are not fully yet adopted in Kazakhstan's construction sector [4].

In addition to that, inadequate project planning and management can lead to delays and budget overruns; inefficiencies in the supply chain can disrupt material and equipment delivery. Addressing these complex concerns is critical for effective and long-term building in Kazakhstan. In today construction sector experiences rapid technological progress, a particular breakthrough emerges as possessing profound transformative potential: Artificial Intelligence (AI). The construction industry faces a multitude of challenges. There is a growing recognition of AI's potential to mitigate these challenges meaning that with the increased generation of data throughout the building lifecycle, as well as the introduction of other digital technologies, AI has the potential to utilize this data and use the capabilities of other technologies to enhance construction operations [5]. AI is a multidisciplinary field of computer science that encompasses several disciplines and enables robots to simulate human-like intellect, acquire knowledge, and make decisions. The potential exists for a fundamental transformation in the planning and management of construction projects. The process of using this potential in Kazakhstan is hindered by a substantially notable gap particularly the lack of local research on the integration of artificial intelligence in the construction sector. AI integration in construction is a global phenomenon; the extent of local research in Kazakhstan remains limited. While there is a rapid adoption of AI-driven solutions in global construction hubs, the application of such technologies in Kazakhstan's construction industry is limited due to the lack of resources and local research, and infrastructure.

Therefore, in the context of an industry characterized by a lack of adoption of AI, this paper aims to emphasize the importance of implementing AI-driven innovations in Kazakhstan's

construction sector by analyzing global trends, successful international case studies, and best practices in AI integration within the industry. The primary objective is to facilitate the widespread use of AI technology, improve building methodologies, and stimulate innovation, thus positioning Kazakhstan's construction sector on the forefront in technical advancement and global competitiveness. Guided by the aims and objectives of this paper, this study seeks to answer the following question:

What is the potential for AI technology application in Kazakhstan's construction industry based on international literature?

This article has several sections, including an introduction where the background and significance of the study are presented. The methodology section outlines the thematic literature review procedure. Findings summarize the impact of AI in relation to efficiency, labor and quality control, showcasing international case studies and practices. The discussion part extensively elaborates on the implications of findings to the unique challenges and opportunities within Kazakhstan's construction sector. The article provides future recommendations with a goal to stimulate AI innovation in Kazakhstan's construction sector.

The methodology

This study used a thematic literature synthesis as an approach to analyze and identify key trends in the application of artificial intelligence (AI) within the construction sector. We focused on three thematic areas that appeared in scientific literature: efficiency, labor productivity, and quality enhancement.

Connected papers was used as the main search tool to enter the field, which provided a visual network of publications based on bibliographic coupling and co-citation; relevant publications identified during the search were subsequently used as new seed papers. This process of search was repeated, progressively expanding the search through bibliographic coupling and co-citation links.

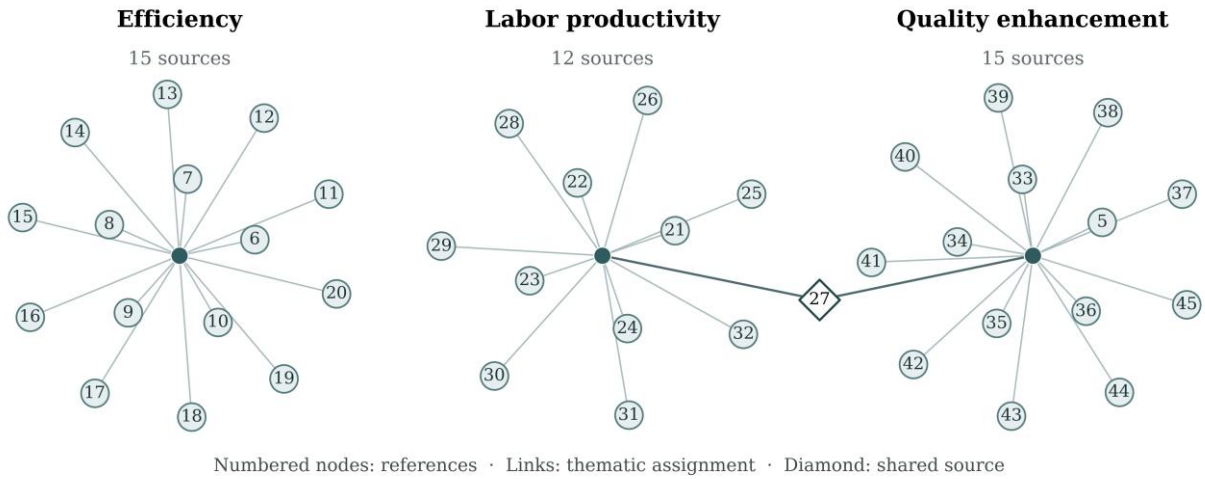


Figure 1. Thematic map of the 41 sources discussed in the three results subsections. Numbered nodes correspond to bibliography entries; links indicate assignment to a theme, not citation relationships. Source [27] contributes to two themes. Compiled by the authors.

This article is a thematic narrative review of AI and related digital technologies in construction. The analysis is organized around efficiency, labor productivity, and quality enhancement. Figure 1 and Table 1 map the 41 distinct sources cited in the three thematic results subsections preceding

Table 2; it does not represent a sample obtained through a reproducible systematic screening procedure. Each source is counted once within a subsection, and sources relevant to more than one subsection are counted in each corresponding row but only once in the overall total. Earlier publications are retained where they provide relevant technological or contextual background. Table 2 groups selected applications by technology, construction task, and potential implications for Kazakhstan. These implications are qualitative analytical proposals rather than locally measured effects. The synthesis does not pool effect sizes, and differences in study design, application context, and data availability limit direct comparisons between publications.

Table 1. Sources cited in the thematic results subsections

Theme	Number of cited sources	References
Efficiency	15	[6–20]
Labor Productivity	12	[21–32]
Quality Enhancement	15	[5, 27, 33–45]
Total distinct sources	41	[5–45]

Note: Counts cover the three thematic results subsections preceding Table 2. Reference [27] is cited in two subsections, so the row counts sum to 42 and the distinct-source total is 41. Citations appearing only in Table 2 or in the subsequent discussion are excluded.

Findings/Discussion

Efficiency

It is critical to recognize the difficulties that the building sector is facing today. The lack of digital skills and unwillingness to use innovative technologies have been linked to cost inefficiencies, project delays, and poor quality, productivity, and safety [6]. The introduction of AI-driven solutions has triggered a transformative revolution, resulting in significant improvements in processes, cost-efficiency, reduced production times, and enhanced safety measures while also aligning with sustainability goals [7–9]. Salih and El-Adaway [8] identified improved safety, increased productivity, informed decision-making, and enhanced monitoring and control as the affordances most consistently recognised both in their survey of 52 construction practitioners and the reviewed literature. The findings showed that the adoption of AI techniques and construction technologies could improve cost management by 64.66%, time-management performance by 70.18%, and quality management by 60.73%. Furthermore, the study found that productivity improvements affected project time and cost. In addition, monitoring, decision-making and improved safety influenced three targeted principal project objectives, including time, cost and quality.

The use of artificial intelligence (AI) tools in construction management has emerged as a critical driver for improving operational efficiency and overall project success. Process mining, an AI-enabled technique, has acquired attention for its ability to derive substantial insights into the complexities of building operations, as reported in many literature sources. Process mining, among other things, makes it easier to analyze essential operations, forecast deviations, identify hidden bottlenecks, and extract collaborative patterns. Such expertise is indisputably critical in assuring

the success of construction projects and directing the optimization of the construction execution process. This optimization comprises removing unnecessary stages, reducing rework and disputes, avoiding possible delays, and encouraging improved cooperation, which, in turn, allows decision-makers to act proactively [10–13].

Furthermore, optimization algorithms have shown to be effective tools for developing building plans that achieve the best balance of time, money, and quality [14–16]. Son and Khoi [14] extended this optimisation approach by additionally incorporating work continuity along with time, cost, and quality. AI-powered robots have shown tremendous potential in labor-intensive, repetitive construction jobs such as bricklaying, welding, and tiling [17]. These robots work continuously, without breaks, and with consistent quality, highlighting the enormous potential for improving efficiency, productivity, and, ultimately, profitability in the construction sector [18].

The handling of large volumes of data in the construction sector involves the use of advanced data analytics techniques, particularly with a focus on waste reduction. This need includes the combination of AI approaches with Building Information Modelling (BIM) to make it efficient to optimize numerous aspects such as design for material selection, offshore construction, reuse, recovery, deconstruction, and flexibility and waste-efficient procurement [19, 20].

Labor Productivity

Given the current challenges confronting the construction industry, such as labor shortages, the disruptive impact of the Covid-19 pandemic, and the imperative to meet the growing demand for sustainable infrastructure, the field's consensus emphasizes the importance of embracing digitization and augmenting technological capabilities [21, 22]. This overriding goal may be seen in numerous significant topics discussed in the review article.

The most prominent of them is the expanding investigation of machine learning as a transformational remedy to labor scarcity in the construction industry [23–26]. With the potential to significantly increase production and efficiency, machine learning offers the promise of optimizing resource allocation within construction projects, a capability that cannot be overstated. A parallel industrial effort is based on the purposeful deployment of optimization techniques to recalibrate and simplify building processes. This strategy execution guarantees that resources are used wisely, boosting the industry's productivity efforts [27].

Simultaneously, the construction industry is witnessing amazing advances in robots that can mitigate manual labor [22]. This technological vanguard, exemplified by innovations such as 3D printing and exoskeletons, is essentially reducing the industry's reliance on manual labor, a development that addresses the threat of labor shortages while also enabling efficiency in construction processes [28].

The transformational potential of AI scheduling programmes, as strongly advocated by industry expert Rene Morkos, deserves full recognition. It is noted that adherence to such AI-driven programmes is expected to provide substantial benefits, including a 16% reduction in average project length and an 11% reduction in labor expenses [29]. As a result, this technological integration emphasizes the construction industry's dedication to increasing efficiency and cost-effectiveness.

The imminent talent vacuum caused by the upcoming retirement of a significant portion of the construction industry's personnel is a growing issue. Therefore, AI and machine learning algorithms appear as vital tools for optimizing labor allocation across diverse projects, providing a long-term solution to the skill [22, 30].

In addition, it is observed that in the construction industry, autonomous cars play a critical role in the continuous monitoring of project progress, providing stakeholders with real-time data

on areas at risk of slippage and needing more labor resources [31].

Despite these technical advances, a notable gap emerges: the data connectivity between human labor and technology interfaces remains insufficient, an issue that is especially noticeable in an industry known for its labor-intensive operations. To address this issue, efforts are being made to promote digital solutions across the construction lifecycle. The integration of sensors and the use of smart wearable technologies are important components of this revolutionary vision, with the promise of a more fluidly integrated and efficient building process [32].

As is evident, these studies demonstrate that AI improves labour productivity in construction through productivity prediction, reduced reliance on labour-intensive tasks, automation, and workforce optimisation.

Quality Control

Quality improvement appears to be a recurring subject in construction studies; in the construction industry's quest for perfection, the confluence of cost and quality remains a critical factor. The prolific development of unstructured data in the form of photographs, videos, and different reports is becoming increasingly common in the construction industry. The strategic incorporation of this data into Building Information Modelling (BIM) systems, in conjunction with the use of advanced AI techniques, emerges as a transformative approach to optimizing site performance across critical domains such as planning, design, safety, quality, schedule, and cost [27]. The urgent need for the development of holistic site analytics solutions driven by AI and cloud-based real-time analytics is a key subject that emerges in this context. Such solutions offer to improve quality control and match building projects with set performance goals.

Kim et al. [33] developed a multi-sensor deep-learning approach for framework-distortion inspection, thus reducing data-acquisition time. This, at the same time, enabled maintaining an average angular error of 0.28°. Deep-learning approaches have also been applied to visual defect detection in construction, in particular, in buildings and infrastructure. Using this model, Hacıefendioğlu et al. [34] detected masonry cracks. Similarly, applying the same model, Lee et al. [35] and Zheng et al. [36] identified tunnel-surface defects. Zhao et al. [37] further coupled deep learning with computer vision to investigate defect detection in additive construction and real-time quality monitoring. In addition, Zhang et al. [38] demonstrated a UAV-based approach to tunnel inspection. These studies show that AI can improve the speed, precision, and labour efficiency of construction in quality control.

The integration of AI-driven chatbots suited to construction sites is a significant resource for project managers and other stakeholders, allowing real-time information on site operations and therefore improving situational awareness and decision-making [5, 39, 40].

The application of Internet of Things (IoT) technology reveals novel techniques to real-time risk monitoring in construction. For example, an IoT-based solution employs cloud database services, wireless sensors, and fuzzy logic to efficiently regulate product quality and occupational safety concerns in cold chains, highlighting the critical role of technology in improving construction site quality management [41, 42].

Finally, AI-powered chatbots created expressly for supply chain management systems provide a streamlined channel for getting essential information, making them a vital tool in the current dynamic construction [43–45]. As such in the context of current construction scenario integration of AI chatbots appears serves as driver enhancing transparency and sustainable growth of construction industry fostering innovation in organizational culture in which the effective decision making and quality of communication transitions into a new stage.

These findings demonstarte that AI strengthens and enhances construction quality control by detecting and localising defects, automating inspection enabling faster, more precise and consistent quality assessment.

Table 2 summarizes the principal applications discussed above and their potential implications for construction practice in Kazakhstan.

Table 2. Thematic synthesis of selected studies — Efficiency

Note: Reference numbers correspond to the bibliography. Implications for Kazakhstan are the authors' analytical proposals; they are not measurements from the cited studies.

Studies and references	Technology and application	Synthesis from the manuscript	Implications for Kazakhstan
Salih & El-Adaway (2024, 2025) [8, 9, 46]	AI and construction technologies. Project time, cost and management performance.	The synthesis links technology adoption with improved monitoring, decision-making and coordination of project objectives.	Assess schedule and cost outcomes against a documented project baseline; account for organizational readiness.
Son & Khoi (2023) [14]; Yılmaz & Dede (2023) [15]; Aminbakhsh & Ahmed (2024) [16]	Optimization algorithms. Construction scheduling and competing project objectives.	The studies address scheduling trade-offs. Work continuity is explicitly included in the Son and Khoi formulation.	Define project-specific objectives, precedence relationships and resource constraints before applying optimization.
Gopi Krishna & Dinesh Kannaa (2024) [17]; Galeazzi & Gonçalves e Silva (2024) [18]	Robotics and AI-assisted welding. Automation of repetitive construction and fabrication tasks.	The synthesis identifies robotics and automated welding as routes to more consistent execution and reduced reliance on repetitive manual operations.	Evaluate task suitability, equipment costs, operator skills and site safety before deployment.
Sriram et al. (2025) [19]; Du et al. (2024) [20]	BIM, decision support and data interoperability. Information-based construction decisions.	The cited works concern BIM-driven decision support and BIM/IFC data readiness for AI integration.	Check model completeness and data exchange before selecting an AI application; define the decision the model must support.
Adhikari et al. (2024) [21]; Sadeh et al. (2024) [22]	Construction digitalization. Productivity and responses to labor shortages.	These studies frame digitalization and technology adoption as responses to workforce constraints.	Measure labor hours and output at task level; include training and adoption requirements in pilot evaluations.
Lim et al. (2024) [23]; Chen et al. (2025) [24]	Machine learning and AI applications. Activity-level productivity and	These reviews provide context for productivity prediction, resource	Select a defined construction activity and verify the availability of representative local data.

	infrastructure construction.	allocation and AI applications in construction.	
Sadatnya et al. (2023) [25]; Taha et al. (2025) [26]	Machine learning; explainable prediction. Crew productivity and rebar-fixing productivity.	The cited applications concern prediction from daily work reports and estimation of productivity in rebar-fixing tasks.	Standardize site records and test predictions on separate projects; examine whether explanations are useful to site managers.
Hossain et al. (2020) [28]	Construction 3D printing. Changes in labor demand and task composition.	The synthesis links automation with reduced reliance on some manual tasks and with changes in required workforce skills.	Assess changes in crew composition, training needs and supporting tasks; do not equate automation with elimination of all labor.
Kim et al. (2024) [33]	Multi-sensor fusion and deep learning. Inspection of geometric distortion.	The cited work describes automated distortion inspection and reduced data-acquisition effort.	Validate measurement performance against an independent geometric survey under representative site conditions.
Hacıefendioğlu et al. (2023) [34]	Deep learning with images. Crack detection in historical masonry.	The cited work presents an application of automated visual crack detection.	Use representative images of local masonry; retain engineering assessment of crack causes and structural significance.
Lee et al. (2023) [35]; Zheng et al. (2024) [36]	Deep learning with tunnel images. Detection of tunnel surface and lining defects.	The cited applications support automated identification of visible defects in tunnel inspection imagery.	Test across lighting, moisture and surface conditions; distinguish visible-defect detection from assessment of hidden damage.
Zhao et al. (2024) [37]	AI-based visual monitoring. Quality monitoring in additive construction.	The cited work describes real-time monitoring and defect detection during additive construction.	Define detectable defects and acceptance criteria; connect monitoring outputs to a documented inspection procedure.
Zhang et al. (2024) [38]	UAV-based automated inspection. Tunnel surface defect inspection.	The cited work presents automated tunnel inspection using an unmanned aerial vehicle and a field test.	Assess access, image coverage and operational safety; require engineering review of identified defects.

Implications for Kazakhstan

The fast growth of AI technology in the twenty-first century has had a significant influence on different parts of industry and business. AI, in particular, has emerged as a potent tool for solving several crucial concerns, including efficiency and cost reduction, labor and management, quality control, and safety, as the literature suggests. The core question of this paper is about the

revolutionary potential of AI and its influence on Kazakhstan's construction sector. It focuses on major aspects of Efficiency, Labor and Quality Control. The findings provided here highlight the significant consequences of incorporating AI into the Kazakhstani construction sector. Kazakhstan ambitiously implemented industrialization policy; as a result, two programs have been developed: Accelerated Industrial and Innovative Development Program for 2010-2014 (hereinafter referred to as the SPFIID); Industrial and Innovative Development of the Republic of Kazakhstan for 2015-2019 (SPIID); and BIM adoption in 2016 under the umbrella of Technology of Information Modeling of Construction Facilities (TIMCF). Though the programmes have already been accomplished, Kazakhstan's policy in industrialization will continue, since the industrial sector accounts for a sizable portion of the country's Gross Domestic Product (GDP). The industrial complex generated around 28% of Kazakhstan's GDP in 2014 [47].

In the context of industrialization policy, it becomes clear that using AI's potential is critical for Kazakhstan's construction sector, providing a route towards increased efficiency, cost savings, and greater quality control. Construction activity frequently increases as industrialization proceeds. This is because the expansion of industries, manufacturing, and infrastructure development, all of which are critical components of industrialization, requires the construction of new buildings, factories, warehouses, and infrastructure. As such, by providing suitable infrastructure and facilities for industrial expansion, the construction industry plays a pivotal role in assisting the country's industrialization efforts. As a result, industrial growth has a direct and beneficial influence on the construction industry since it produces demand for construction projects and services. As a result, the industrial sector's dynamics have a significant impact on the country's economic growth rate.

Efficiency

Across the reviewed literature, efficiency in construction encompasses productivity, schedule, resource use, cost, quality, safety and decision-making. Along with process mining, optimisation, robotics, automation, BIM, and generative AI, these reviewed studies, more specifically Salih and El-Adaway [8, 46] addressed these aspects comprehensively. Collectively, the findings demonstrate that AI can improve prediction, monitoring, automation, coordination, and resource allocation. However, it is important to note that these benefits highly depend on digital infrastructure, data quality, workforce capabilities, structural readiness and alignment between AI tools and construction project needs.

When we explore the significance of these findings in the context of Kazakhstan, we may see an environment suitable for an AI-driven construction industry revolution. As the global construction sector reaps the benefits of artificial intelligence in terms of efficiency, cost reduction, and enhanced resource management, Kazakhstan may use these technologies to its own building projects. The capacity of AI to improve supply chain management, lower operating costs, and assure safety and security meshes nicely with Kazakhstan's dynamic construction sector.

In an era where competition is severe and organizations are continuously looking for ways to optimize their operations, artificial intelligence (AI) provides a promising path for attaining unprecedented levels of efficiency and cost reduction. Predictive analytics and automation powered by AI have transformed resource allocation, supply chain management, and production planning. Furthermore, AI systems can analyze big data using machine learning algorithms to provide insights that assist companies and organizations simplify operations, reduce waste and maximize resource utilization.

It is important to note that incorporating AI into Kazakhstan's construction sector is in line with the country's digital transformation strategy. The government's 2013 Information

Kazakhstan-2020 Programme lays the framework for the country's digital transformation, concentrating on information infrastructure, open government institutions, and enhanced public administration. Kazakhstan's Digital Kazakhstan Programme, launched in 2017, focuses on digitalizing economic sectors and cultivating a digital state to accelerate economic development and improve quality of life. This holistic integration of AI not only supports the Kazakhstan's national policy but also provides substantial benefits to the construction industry in terms of resource management., efficiency and cost reduction. The ability of AI to improve supply chain management, cut operational costs, and assure safety and security is a right match for Kazakhstan's dynamic construction sector.

Kazakhstan, like many other countries, is confronted with the issue of increasing competitiveness and the ongoing pursuit of operational excellence. Kazakhstan may put itself on the cutting edge of innovation by implementing AI solutions in construction, leading to more efficient, cost-effective, and sustainable building practices. For instance, in the manufacturing industry, AI-powered predictive maintenance may dramatically minimize downtime and costly unplanned repairs. AI-powered demand forecasting can help businesses manage inventory more effectively, lowering carrying costs and stockouts. AI-driven demand forecasting, for example, helps simplify material procurement, minimizing delays and cost overruns. Also, AI-powered energy management systems can optimize resource utilization, support sustainability goals while lowering operating costs. In summary, the article's findings open the path for Kazakhstan to embrace AI as a revolutionary force in the construction sector, enhancing efficiency, lowering costs, and fostering project delivery excellence.

Labor productivity

As far as labor productivity is concerned, the changing workplace landscape, significantly affected by artificial intelligence (AI), is having a dramatic impact on the nature of work itself, and this shift is very relevant to Kazakhstan's context. As has been mentioned the construction industry is one of the core sectors contributing to employment in Kazakhstan. In the construction sector the small and medium-sized enterprises (SMEs) play a crucial role in minimizing unemployment by creating job opportunities [48]. AI has emerged as a critical facilitator for remote work and effective labor management, a development with significant ramifications for both domestic and foreign workforces [49]. AI-powered solutions are critical for sustaining collaboration, productivity, and oversight, especially as remote work becomes more common. In this environment, AI-powered project management and collaboration solutions provide real-time insights to teams while improving communication and enabling seamless coordination across geographical borders. Furthermore, AI chatbots and virtual assistants contribute to greater employee assistance, reducing the pressure on HR and IT departments, a trend that is expected to continue.

In addition, the use of AI-powered site service management systems with such features such as route optimization, predictive scheduling and remote diagnostics has the potential to not only enhance field operations efficiency but also lower labor costs associated with travel time and maintenance.

As is demonstrated the reviewed literature identifies direct mechanisms through which digital technologies and approaches can influence labour productivity. These mechanisms include optimising workforce allocation, automating labour-intensive tasks, predicting crew productivity and improving coordination between digital systems and workers [21–26, 28]. More importantly, these imply workforce transformation rather than the direct replacement of construction workers.

This is because productivity gains depend on workers' capacity to interpret, operate and collaborate with AI-enabled technologies.

As the global construction landscape focuses on machine learning, optimization, robotics, and AI scheduling, it stands to reason that Kazakhstan's construction sector can also benefit from these advancements to address labor shortages, improve efficiency and meet rising demand for sustainable infrastructure. The ability to optimize labor allocation within building projects using real-time data.

However, in Kazakhstan, as in many other countries, there is a continuing need to bridge the data gap that separates human labor from technical solutions. While Kazakhstan has achieved tremendous progress in its digital transformation initiatives, social programmes that bridge the data gap between human labor and technology solutions are still needed. Existing programmes, such as those focusing on education and workforce development, should be strengthened to achieve this aim. Therefore, at the Digital Bridge 2025 forum, President of Republic of Kazakhstan Tokayev proposed establishing an AI university to train professionals and drive innovation [50]. These programmes can emphasize the need for digital literacy and skill development in order to guarantee that the country's workforce is ready to capitalize on the full potential of AI and technology in a variety of industries, including construction. This collaboration will assist not just the building business, but also Kazakhstan's general socioeconomic growth.

This initiative emphasizes the significance of incorporating AI and digital solutions into the construction ecosystem, opening the door for a more streamlined and efficient approach to constructing projects. As Kazakhstan's construction industry embraces artificial intelligence and digital transformation, it will be better positioned to meet and address the challenges of the workforce and achieve advanced levels of efficiency and sustainability, ultimately contributing to the country's development and competitiveness in the global arena.

Quality Control

Based on our review article results, it is clear that AI's disruptive potential extends beyond industry-specific applications, as emphasized in many areas. According to our findings, using AI-driven quality control methodologies has demonstrated amazing performance in improving product quality, minimizing risks, and assuring customer satisfaction internationally.

These study findings show that AI is enhancing and, in particular, shifting construction quality control from manual inspection towards continuous, automated monitoring. Such technologies and approaches as deep learning, multi-sensor and UAV-based systems, and computer vision, support more precise and timely detection of structural distortions, surface defects and cracks in buildings and infrastructure [33–38].

While the State Programme for Industrial-Innovative Development, which ran from 2010 to 2014 and from 2015 to 2019, set the foundation for a robust industry in the state, it is critical to recognize that certain sectors, such as quality control, are still in their infancy. According to an international study, integrating AI technology can result in major benefits. This implies that Kazakhstan's existing industrial strategies can benefit from AI-driven quality control advancements, aligning with global industry standards and improving its competitiveness.

It is important to mention that AI technologies are transforming traditional quality control methods by adding predictive and preventative approaches. Visual inspections integrated with AI systems may detect faults and barriers in production processes quickly, substantially lowering the risk of poor items reaching customers. Furthermore, AI-enhanced analytics can monitor and regulate quality parameters, allowing for real-time modifications and reducing production variances.

AI-driven diagnostic tools and predictive analytics in healthcare aid in spotting possible concerns before they escalate. AI algorithms, for example, may analyze patient data to anticipate illness outcomes, improving treatment quality and lowering medical mistakes.

Conclusion

In conclusion, this review study emphasizes the revolutionary potential of AI and technology in the construction industry. The incorporation of AI techniques into the building processes holds the potential of improved performance in a variety of areas, including quality, safety, and efficiency. The incorporation of real-time data analytics, IoT, and AI-powered chatbots emphasizes the evolving landscape of construction, in which data-driven decision-making, quality optimization, and supply chain efficiency play critical roles in shaping the industry's future.

However, it is important to not these benefits are not directly related to the automatic outcomes of AI adoption. The realisation of these technologies and approaches depends on digital infrastructure, workforce capabilities, reliable data, and organisational readiness. This indicates that these conditions are relevant across different contexts, with Kazakhstan providing an illustrative case of how rapidly developing emerging digital economy might translate aforementioned global AI developments into construction practice.

In order to adopt AI technologies, it is critical to recognize their potential for making companies and society more efficient, cost-effective, and safe. Due to generous government investment in infrastructure, the construction sector in Kazakhstan is predicted to rise by 6.7% in real terms this year, before averaging 5.5% every year by 2026 [51]. Therefore, the role of AI is crucial to realize and implement the government’s national plan in relation to the construction sector. The combination of real-time data analytics and AI-powered chatbots emphasizes the construction industry's shifting landscape. Data-driven decision-making, quality optimization, and supply chain efficiency will be critical in Kazakhstan. As the literature review demonstrates, the potential of integrating AI is crucial in the construction sector and this demonstrates important implications for the construction industry of Kazakhstan.

Limitations and Recommendations

However, the international practice of using AI in construction industry demonstrates high potential integrating it in construction processes the context of Kazakhstan may make this transition difficult. First of all, at the macro level the country has limited access to technological resources, sustainable uncertainty, systemic fragmentation of labor market. As such the use of AI is not without challenges, such as the high cost of advanced IT infrastructure, the lack of standardized performance measurement frameworks, and trust and communication barriers within organizations in Kazakhstan. Therefore, despite the attractiveness of these global cases in effective AI use realization and feasibleness of such approaches in Kazakhstan requires holistic approach, institutional reform and sustainable adaptation to technological environment. However, despite the international study findings offer valuable insights for Kazakhstan, application of these technologies and aproaches should be adapted to the country’s specific organisational, technological and workforce conditions. Therefore the future research should compare how Kazakhstan and different countries address common challenges in adopting AI in construction sector. As such, ased on the literature review findings and identified limitations, three key recommendations for Kazakhstan's construction sector are presented. Following these recommendations, Kazakhstan's construction industry can utilize the transformative potential of AI for enhancing efficiency, labor productivity and quality in the construction sector contributing

to the country's construction industry development and competitiveness on a global scale. The first recommendation includes that at a macro systems level Kazakhstan needs to adopt holistic approach in AI integration embracing all strategic sectors. Aligning to country's national policy, the construction industry needs structural change to proactively use AI-powered technologies to improve productivity, optimize resource allocation and cut costs. This involves the use of AI-powered project management, machine learning–driven scheduling systems, predictive analytics, digital twins and robotics to enhance operations. Secondly, Kazakhstan needs to invest in workforce development programmes with focus on digital skills and AI competence to solve labor shortages and skill gaps. This will mitigate the sector to use on AI breakthroughs. Finally, Kazakhstan needs to incorporate AI-powered quality control approaches into building processes to detect any potential flaws and manage quality standards. This will provide guarantees that projects meet high-quality requirements while also minimizing the risks.

Acknowledgement, conflict of interests

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan under Grant No. AP26103223.

The contribution of the authors

D.O. Bazarbayev: conceptualization of the review, formulation of the research question, development of the review methodology, supervision, and critical revision of the manuscript.
D.K. Zhumadullaev: analysis and interpretation of the reviewed literature on construction efficiency, synthesis of the findings, and critical revision of the corresponding sections.
L.I. Ramatullaeva: analysis and interpretation of the reviewed literature on quality control, development of the discussion of these findings, and critical revision of the corresponding sections.
S.S. Shukirova: literature search and screening, extraction and organization of information from the selected publications, and preparation of the initial manuscript draft.
B.T. Uakhitova: analysis and interpretation of the reviewed literature on labor productivity, assessment of the implications for Kazakhstan's construction sector, and critical revision of the corresponding sections.

References

1. Laszig L. et al. Effect of Innovation on Productivity in the Construction Industry: A Literature Review // Construction Research Congress 2020. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. P. 546–555.
2. Azhar S., Khalfan M., Maqsood T. Building information modelling (BIM): now and beyond // Construction Economics and Building. Australian Institute of Quantity Surveyors, 2015. Vol. 12, No. 4. P. 15–28.
3. Aitbayeva D., Hossain Md.A. Building Information Model (BIM) Implementation in Perspective of Kazakhstan: Opportunities and Barriers // Journal of Engineering Research and Reports. 2020. P. 13–24.
4. Kulakov K.Y., Orlov A.K., Kankhva V.S. Evaluation of Lean Manufacturing Tools and Digital Technologies Effectiveness for Increasing Labour Productivity in Construction // Systems. 2023. Vol. 11, No. 12. P. 570.
5. Abioye S.O. et al. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges // Journal of Building Engineering. Elsevier,

2021. Vol. 44. P. 103299.
6. Nikas A., Poulymenakou A., Kriaris P. Investigating antecedents and drivers affecting the adoption of collaboration technologies in the construction industry // Autom Constr. Elsevier, 2007. Vol. 16, No. 5. P. 632–641.
7. Zhong Y., Chen Y., Yang G. Research on the Practice Path of Workers in Rural Construction Industry Promoted by the Construction of AI-Based Digital Sharing Training Base // 2024 4th International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology, CEI 2024. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. P. 405–412.
8. Salih F., El-Adaway I.H. Achieving Project Objectives and Improving Functions: The Benefits
of AI and Construction Technologies // Construction Research Congress 2024. American Society of Civil Engineers, 2024. Vol. 1. P. 1–11. DOI: 10.1061/9780784485262.001.
9. Salih F., El-Adaway I.H. Investigating the Correlation and Synergy of Artificial Intelligence Techniques, Construction Technologies, and Their Key Benefits // Journal of Architectural Engineering. 2025. Vol. 31, No. 4. P. 04025039. DOI: 10.1061/JAEIED.AEENG-1979.
10. Ahmed Banafa, "16 IoT, AI and Blockchain: Catalysts for Digital Transformation," in Secure and Smart Internet of Things (IoT): Using Blockchain and AI , River Publishers, 2018, pp.113-120.
11. Alenazy W.M. Blockchain-Enabled Internet of Things for Unsupervised Structural Health Monitoring in Potential Building Structures // https://services.igi-global.com/resolvedoi/resolve.aspx?doi=10.4018/978-1-7998-6870-5.ch011. IGI Global Scientific Publishing, 2021. P. 158–170.
12. Zou P.X.W., Ma S. Digital Twin Technology for Improving Safety Management in Construction // Lecture Notes in Operations Research. Springer, Singapore, 2023. Vol. Part F3795. P. 40–56.
13. Chernyshev D. et al. Integration of Building Information Modeling and Artificial Intelligence Systems to Create a Digital Twin of the Construction Site // International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. Vol. 2022-November. P. 36–39.
14. Son P.V.H., Khoi L.N.Q. Optimization time-cost-quality-work continuity in construction management using mutation–crossover slime mold algorithm // Appl Soft Comput. Elsevier, 2023. Vol. 147. P. 110775.
15. Yılmaz M., Dede T. Multi-objective time–cost trade-off optimization for the construction scheduling with Rao algorithms // Structures. Elsevier, 2023. Vol. 48. P. 798–808.
16. Aminbakhsh S., Ahmed A. Optimization-based scheduling of construction projects with generalized precedence relationships: A real-life case study // Scientia Iranica. 2024. Vol. 31, No. 19. P. 1809–1824. DOI: 10.24200/sci.2023.59493.6275.
17. Gopi Krishna K., Dinesh Kannaa K. AI-Driven Robotics in Automated Construction: Enhancing Efficiency, Precision, Safety, and Sustainability // 2024 First International Conference on Data, Computation and Communication (ICDCC). IEEE, 2024. P. 150–155.
18. Galeazzi D., Gonçalves e Silva R.H. Development of a Laser Tracking System Based AI for Automatic Root Pass Welding in Pipes // Proceedings of the Biennial International Pipeline Conference, IPC. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2024. Vol. 3.
19. Sriram A.G. et al. MCDM approaches in BIM driven decision making models in enhancing

energy efficiency for sustainable 3D printed infrastructure in the construction industry // Environ Prog Sustain Energy. John Wiley and Sons Inc, 2025. P. 1–23.
20. Du S. et al. BIM and IFC Data Readiness for AI Integration in the Construction Industry: Review Approach // Buildings 2024, Vol. 14, Page 3305. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2024. Vol. 14, No. 10. P. 3305.
21. S. Adhikari et al. Effect on Labor Productivity Due to Construction Digitalization: A Pilo Study // Proceedings of 60th Annual Associated Schools of Construction International Conference. EPiC Series in Built Environment, 2024. P. 704–711.
22. Sadeh H. et al. Technological solutions to labor shortages in construction: Assessin productivity and innovation adoption // 2024 European Conference on Computing in Construction. Crete, 2024. P. 1–8.
23. Lim Y.T., Yi W., Wang H. Application of Machine Learning in Construction Productivity a Activity Level: A Critical Review // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 22. P. 10605.
24. Chen K. et al. Artificial intelligence in infrastructure construction: A critical review Frontiers of Engineering Management. Higher Education Press Limited Company, 2025. Vol. 12, No. 1. P. 24–38.
25. Sadatnya A., Sadeghi N., Sabzekar S., Khanjani M., Tak A.N., Taghaddos H. Machine learnin for construction crew productivity prediction using daily work reports // Automation in Construction. 2023. Vol. 152. P. 104891. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104891.
26. Taha F.F., Ahmed M.A., Aldhamad S.H.R., Imran H., Bernardo L.F.A., Nepomuceno M.C.S Explainable Machine Learning-Based Estimation of Labor Productivity in Rebar-Fixing Tasks // Eng. 2025. Vol. 6, No. 9. P. 219. DOI: 10.3390/eng6090219.
27. Alrasheed K.A. Enhancing construction management with machine learning-integrate building information modeling: a transformative approach // Discover Civil Engineering. 2025. Vol. 2, No. 1. P. 155.
28. Hossain Md.A. et al. A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market // Sustainability. 2020. Vol. 12, No. 20. P. 8492.
29. Regona M. et al. Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 8, No. 1. P. 45.
30. Kineber A.F. et al. Revolutionizing construction: A cutting-edge decision-making model for artificial intelligence implementation in sustainable building projects // Heliyon. Elsevier, 2024. Vol. 10, No. 17. P. 1–17.
31. Bathla G. et al. Autonomous Vehicles and Intelligent Automation: Applications, Challenges, and Opportunities // Mobile Information Systems / edited by Kumar Reddy M.P. John Wiley & Sons, Ltd, 2022. Vol. 2022, No. 1. P. 1–36.
32. Cheng T., Teizer J. Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications // Autom Constr. 2013. Vol. 34. P. 3–15.
33. Kim J., Kim J., Lian Y., Kim H. Automated Defect Inspection in Building Construction with Multi-Sensor Fusion and Deep Learning // Proceedings of the 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction. 2024. P. 1097–1103. DOI: 10.22260/ISARC2024/0142.
34. Hacıefendioğlu K., Altunışık A.C., Abdioğlu T. Deep Learning-Based Automated Detection of Cracks in Historical Masonry Structures // Buildings. 2023. Vol. 13, No. 12. P. 3113. DOI: 10.3390/buildings13123113.

35. Lee K., Lee S., Kim H.Y. Deep Learning-Based Defect Detection Framework for Ultra-High Resolution Images of Tunnels // Sustainability. 2023. Vol. 15, No. 2. P. 1292. DOI: 10.3390/su15021292.
36. Zheng A., Qi S., Cheng Y., Wu D., Zhu J. Efficient Detection of Apparent Defects in Subway Tunnel Linings Based on Deep Learning Methods // Applied Sciences. 2024. Vol. 14, No. 17. P. 7824. DOI: 10.3390/app14177824.
37. Zhao H., Wang X., Sun J., Wang Y., Chen Z., Wang J., Xu X. Artificial Intelligence Powered Real Time Quality Monitoring for Additive Manufacturing in Construction // Construction and Building Materials. 2024. Vol. 429. P. 135894. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135894.
38. Zhang R., Hao G., Zhang K., Li Z. Reactive UAV-Based Automatic Tunnel Surface Defect Inspection with a Field Test // Automation in Construction. 2024. Vol. 163. P. 105424. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105424.
39. Joshi H. Artificial Intelligence in Project Management: A Study of The Role of Ai-Powered Chatbots in Project Stakeholder Engagement // Indian Journal of Software Engineering and Project Management. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 20–25.
40. Lin W.Y. Prototyping a Chatbot for Site Managers Using Building Information Modeling (BIM) and Natural Language Understanding (NLU) Techniques // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 6. P. 2942.
41. Kanan R., Elhassan O., Bensalem R. An IoT-based autonomous system for workers' safety in construction sites with real-time alarming, monitoring, and positioning strategies // Autom Constr. Elsevier B.V., 2018. Vol. 88. P. 73–86.
42. Anjum K.N., Ayuns Luz A.L. Investigating the Role of Internet of Things (IoT) Sensors in Enhancing Construction Site Safety and Efficiency // International Journal of Advances in Engineering and Management. 2024. Vol. 06, No. 12. P. 463–470.
43. Taher G. Industrial Revolution 4.0 in the Construction Industry: Challenges and Opportunities // Management Studies and Economic Systems. ZARSMI, 2021. Vol. 6, No. 3/4. P. 109–127.
44. Adel K., Elhakeem A., Marzouk M. Chatbot for construction firms using scalable blockchain network // Autom Constr. Elsevier, 2022. Vol. 141. P. 104390.
45. Culot G., Podrecca M., Nassimbeni G. Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review of empirical studies and research directions // Comput Ind. Elsevier, 2024. Vol. 162. P. 104132.
46. Salih F., El-Adaway I.H. Quantifying the Impact of Technology Utilization on Schedule and Cost Performance in Construction Projects // Journal of Construction Engineering and Management. 2024. Vol. 150, No. 8. P. 04024078. DOI: 10.1061/JCEMD4.COENG-14679.
47. М.М. Идрисов. Программа индустриально-инновационного развития Республики Казахстан на 2015-2019 гг. // Creative Economy. 2015. P. 253–272.
48. Azimkhan A. Impact of small and medium-sized entrepreneurship on employment in Kazakhstan // Academy of Entrepreneurship Journal. 2020. Vol. 26, No. 3. P. 1–10.
49. Bahamnia H., Kumar Er.R. Exploring the Multifaceted Dimensions of Worker Productivity and Satisfaction in Construction Site Environments // 2024 OPJU International Technology Conference (OTCON) on Smart Computing for Innovation and Advancement in Industry 4.0. IEEE, 2024. P. 1–7.
50. Akorda. Speech by President Kassym-Jomart Tokayev at the Digital Bridge 2025 International Forum [Digital source]. URL: https://www.akorda.kz/en/speech-by-president

kassym-jomart-tokayev-at-the-digital-bridge-2025-international-forum-293529 (accessed: 13.09.2026).
51. Kazakhstan Construction Industry Report 2025: Output to Grow by 6.8% This Year, Supported by Investments in the Transport Infrastructure and Manufacturing Projects Forecast to 2029 - ResearchAndMarkets.com [Digital source]. URL: https://www.businesswire.com/news/home/20250620963244/en/Kazakhstan Construction-Industry-Report-2025-Output-to-Grow-by-6.8-This-Year-Supported-by Investments-in-the-Transport-Infrastructure-and-Manufacturing-Projects---Forecast-to 2029---ResearchAndMarkets.com (accessed: 13.09.2026).

Information about the authors:

Bazarbayev D.O. – main and corresponding author, PhD, Associate professor of L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satbayeva str., 010000, Astana, Kazakhstan
Zhumadullaev D.K. – PhD, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan.
Ramatullaeva L.I. – Head of the Department of the Educational Program "Life Safety and Environmental Protection", Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan.
Shukirova S.S. – PhD Doctoral Student, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan.
Uakhitova B.T. – PhD, Associate Professor, Head of the Department of "Metallurgy and Mining", K. Zhubanov Aktobe Regional University, Aktobe, Kazakhstan.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Article https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-59-72

Exploration of Sustainable Development Pathways for Rural Revitalization in Arid Regions: An Empirical Study of Xinjiang Based on Human Settlements Science

Saierjiang·Halike , Wei Tangzhi*

Xinjiang University, Institute of Civil Engineering, Urumqi, China

E mail: *Saierjiang@xju.edu.cn, 2442662939@qq.com*

Abstract. Rural revitalization in arid regions faces complex challenges encompassing ecological fragility, resource constraints, and industrial homogeneity. This paper adopts the framework of Human Settlements Science, grounded in the natural ecological characteristics and multicultural context of rural areas in Xinjiang's arid regions, to systematically diagnose the underlying causes of their developmental dilemmas. The study argues that breaking the vicious cycle of "ecological fragility—economic lag—industrial homogeneity" is a critical prerequisite for rural revitalization in arid regions. To this end, the paper proposes a systematic strategic framework of "protection—adaptation—empowerment—collaboration", driven by ecological restoration, optimization of water and land resources, cultivation of regional specialty industries, and digital technology empowerment. This framework addresses four dimensions: natural system restoration, adaptive renewal of settlement spaces, establishment of specialized industrial systems, and digital collaborative governance, aiming to explore sustainable development pathways for rural areas in arid regions that balance ecological security, economic vitality, and social resilience

Keywords: Arid regions, Living environments, Fragile ecosystems, Sustainable development, Xinjiang

Received 18.05.2026. Revised 15.08.2026. Accepted 02.09.2026. Available online 30.09.2026

* the corresponding author

Introduction

Xinjiang is located in the northwest of China, covering a total area of approximately 1.6649 million square kilometers, accounting for one-sixth of the country's land area, making it the largest provincial-level administrative region in China by area. Arid zones constitute about 43% of the region, including 420,000 square kilometers of desert and 290,000 square kilometers of Gobi Desert. The extremely arid zone (with annual precipitation <200 mm) dominates areas such as the Tarim Basin, Junggar Basin, and Turpan Basin. As a vital ecological barrier and strategic stronghold in northwestern China, the sustainable development of Xinjiang's rural areas not only concerns regional stability and public welfare but also serves as a critical implementation site where China's two major strategies—"Rural Revitalization" and "Ecological Civilization Construction" —intersect in this unique frontier region.

The Rural Revitalization Strategy, serving as the overarching approach for China's "agriculture, rural areas, and farmers" work in the new era, is a crucial pathway to addressing issues of unbalanced and inadequate development and achieving common prosperity [1]. As a national strategy, its theoretical framework and implementation approach are grounded in the natural and cultural systems of specific regions, closely aligned with their respective developmental stages.

The region generally faces a contradiction between the national strategic requirement for high-quality development and its fragile local ecology. On one hand, the national strategy demands thriving industries, an eco-friendly living environment, and prosperous livelihoods; on the other hand, natural conditions such as drought, water scarcity, ecological fragility, and limited resource and environmental carrying capacity constrain economic development. The traditional extensive development model is no longer sustainable and may even exacerbate the vicious cycle of ecological degradation and poverty. To resolve this contradiction, it is necessary to establish a theoretical framework and practical approach that systematically balances nature conservation, economic development, and social progress.

In 1993, Wu Liangyong first proposed the concept of "Human Settlement Environment Science", developing a systematic theory that emphasizes studying the objective principles governing human living environments from an integrated and interdisciplinary perspective. This groundbreaking theory establishes a research framework for rural human settlement environments, comprising five subsystems: natural, human, social, residential, and supporting [2]. Conduct a comprehensive and integrated study of rural society.

This study adopts a systematic perspective from the field of human settlement science. By identifying the root causes of systemic imbalances, it clarifies the core principles for revitalization and proposes a tiered, actionable strategy framework. The aim is to provide theoretical references and practical guidance for sustainable development in such regions, while exploring a sustainable path that integrates ecological safety, spatial adaptability, cultural continuity, and economic viability.

The methodology

Water resources are a critical component of natural systems. The annual average precipitation in Xinjiang is significantly lower than the evaporation rate, leading to intense competition for agricultural, ecological, and domestic water use. This is accompanied by risks of land desertification and salinization. The area of desertified land in Xinjiang amounts to 746,800 km^2, accounting for 44.86% of the region's total land area [3] (Figure 1). Xinjiang is also the region with the most extensive distribution of saline-alkali land in China, where the area of salinized soil accounts for approximately 30% of the national total [4] (Figure 2). The ecosystem exhibits poor

stability and weak self-repair capacity. Coupled with harsh climatic conditions such as wind-blown sand, intense sunlight, and significant temperature fluctuations, it constitutes an ecosystem with low carrying capacity and high sensitivity. Inappropriate human interventions can readily trigger ecological degradation, lead to environmental pollution, and create a vicious cycle of "resource constraints →development limitations → ecological deterioration", resulting in frequent occurrences of poverty.



Figure 1– Land Desertification.Image source: Internet.



Figure 2– Land salinization and alkalinization.Image source: Internet.

The Diversity and Lagging Nature of Human and Social Systems

Under the harsh constraints of nature, the human and social systems of Xinjiang are unique and complex. Since Zhang Qian's mission to the Western Regions during the Han Dynasty, the Central Plains dynasties governed the region by implementing military strategies such as garrison farming and border defense. Diverse ethnic cultures interacted, exchanged, and integrated here, giving rise to rich livelihood patterns, living customs, social norms, and spatial perceptions. The coexistence of these diverse ethnic cultures has generated differentiated needs and corresponding governance challenges.

At the economic level, rural areas in Xinjiang currently face challenges such as insufficient growth momentum, severe homogenization of development models, and inadequate development of characteristic industries [5]. Although adjustments and optimizations have been made to the industrial structure, the agricultural foundation remains weak, still dominated by low-level crop farming and animal husbandry. The primary agricultural products consist mainly of raw commodities such as cotton and fruit trees, with low added value [6]. The agricultural and livestock sectors are still in the transition phase from traditional to modern practices [7]. The intertwined challenges of a homogeneous traditional industrial structure and a lack of endogenous growth drivers have resulted in sluggish regional economic growth, coupled with insufficient resilience against external market fluctuations and natural risk shocks. The outflow of young and middle-aged laborers has led to a pronounced phenomenon of rural hollowing-out [8]. Under the impact of modernization, the self-organizing capacity of rural areas also faces an urgent need for restructuring and enhancement.

Incompatibility between the residential system and the supporting system

As the physical foundation for housing and support systems, these structures fail to meet the actual spatial demands of daily life and production during the transition between traditional and modern lifestyles. Villages in arid regions generally adhere to the principle of "settling near water sources" when selecting their locations [9]. However, under the impact of modern production and lifestyle patterns, issues such as fragmented land use, mixed functions, or partial regional decline have emerged; Traditional rammed-earth buildings that embody climate adaptation wisdom, such as Aiywang and yurt-style structures, have gradually been phased out due to their inadequate comfort and incompatibility with modern living habits.

The construction of farmland irrigation facilities has progressed slowly, with some irrigation equipment being outdated and water resource utilization efficiency being low, failing to meet the demands of high-efficiency agriculture [10]; The deployment density of new information infrastructure such as 5G base stations is significantly lower than the national average. The deployment density of new information infrastructure such as 5G base stations is significantly lower than the national average. In some remote villages of Xinjiang, communication networks have not achieved full coverage, leaving rural and pastoral areas facing the "last mile" access challenge [11], making it difficult to meet the demands of sustainable economic development.

Analysis of the interaction mechanisms between systems

The scarcity of water resources and weak self-repair capabilities in natural systems directly constrain the stability of rural industrial development, resulting in low economic output with significant volatility. To sustain their livelihoods, farmers often engage in short-term practices such as excessive land cultivation and overgrazing, further exacerbating land degradation and water resource depletion. Limited incomes prevent them from investing in water-saving technologies or ecological conservation, hindering economic growth. The lack of economic opportunities leads to the outflow of young and able-bodied labor, causing rural "hollowing out". This not only undermines rural vitality and development momentum but also hinders the organization of effective collective actions to drive industrial upgrading, thereby perpetuating the state of economic backwardness.

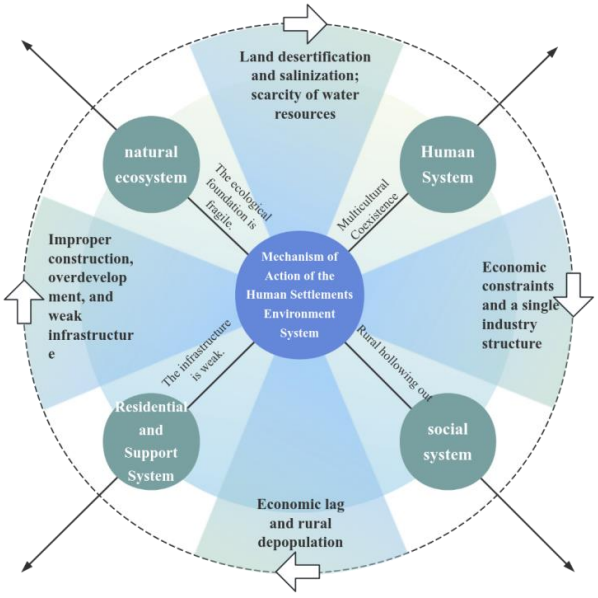


Figure3. Schematic diagram of the circular system for rural living environment in Xinjiang. Drawn by the author.

Inadequate spatial planning and weak infrastructure exacerbate resource consumption, hinder the upgrading of specialized industries, and lead to excessive exploitation of natural resources and improper development practices, which in turn suppress economic growth and population return. From the perspective of the Human Settlements System Theory, the failure to establish positive synergies among systems results in a complex vicious cycle (Figure 3), creating a self-reinforcing negative feedback loop.

The principles of rural revitalization derived from the human settlement system

Revitalization Principle

The complex and interwoven characteristics and challenges of rural areas in the Xinjiang arid region often render fragmented, one-dimensional response strategies largely ineffective, and may even give rise to new systemic issues. Within the specific geographical context of Xinjiang, the relationships among the five major systems—natural, human, social, residential, and support systems—exhibit distinct hierarchical and constraining patterns, leading to the formulation of four core revitalization principles as illustrated in Table 1.

Table 1. The Four Major Revitalization Principles

Ecological Conservation	**Regional Adaptation**	**Cultural Empowerment**	**System Synergy**
1. Determine urban planning, land use, population distribution, and industrial development based on water resources.	1. Smart Response to Natural Ecosystems	1. The Living Transmission and Innovative Expression of National Culture	1. Digital empowerment of rural governance
2. Strictly adhere to the ecological protection red line	2. Advocating adaptive design	2. Avoid homogenization	2. Accurate implementation of resource allocation
3. Protection of key ecological elements	3. Uncover the wisdom of traditional ecology	3. Enhance a sense of identity, product appeal, and added value	3. Enhanced System Forward Cycle
Overall Goal: Enhance the operational efficiency of rural living systems			

Ecological Protection

Consider ecosystem integrity as a critical constraint for land development [12]. Water resources are vital national assets that underpin urban development and economic growth, yet they also represent the most significant constraint. The principles of “planning cities, allocating land, determining population size, and regulating industries based on water availability” constitute fundamental planning guidelines [13]. In practical production and daily life activities, strict controls must be implemented to prevent damage to spatial boundaries such as ecological protection red lines and permanent basic farmland, with priority given to the protection and restoration of critical ecosystems including oases, rivers, and wetlands.

The traditional development model, oriented toward economic growth and spatial expansion, must be grounded in the fundamental principles of ecological security and sustainable resource utilization. Planning and construction activities should establish a mandatory ecological impact

assessment mechanism to ensure that developmental activities remain within the ecological carrying capacity threshold.

Regional Adaptation

Residential and supporting systems must adhere to the core principle of "regional adaptation" to address ecosystem vulnerabilities. Regional design emphasizes adaptability to the natural environment; planning should not deviate from local natural conditions but rather utilize and protect these resources in a context-specific manner while respecting nature, thereby achieving harmonious coexistence between humans and nature [14]. It is essential to thoroughly explore and scientifically translate the construction wisdom accumulated by local residents through their long-term adaptation to drought, sandstorms, and temperature variations.

Cultural Empowerment

The principle of "cultural empowerment", which centers on human and social systems as its core values, seeks to integrate regional characteristics into the dynamic inheritance and innovative expression of multi-ethnic cultures. By leveraging Xinjiang's rich historical and cultural heritage, it aims to prevent severe homogenization. This approach respects, protects, and creatively transforms the historical memories, modes of production and lifestyle, and aesthetic concepts of various ethnic groups, enabling traditional culture to rejuvenate in contemporary life. Consequently, it enhances residents'sense of identity, increases product appeal, and elevates industrial added value.

System Synergy

By applying the principle of digital system collaboration, digital technologies empower rural governance, enabling precise allocation of resources and services, targeted policy implementation, and refined management control. This approach overcomes spatial barriers and resource management challenges with greater precision and efficiency. It strengthens positive interconnections and feedback loops between systems, breaks the vicious cycle, enhances overall efficiency, and improves the operational effectiveness and resilience of the entire rural living system.

Sustainable Pathways for Rural Revitalization in Xinjiang

Guided by the four principles of "ecological protection, spatial adaptation, cultural empowerment, and systemic synergy," an integrated implementation framework encompassing protection, adaptation, empowerment, and synergy was established (Figure 4). Aiming to break the vicious cycle of "ecological degradation–economic poverty–social stagnation–improper development – systemic imbalance – ecological deterioration", the framework comprises a mutually interconnected and progressively layered strategy system across four dimensions: natural system restoration, adaptation of residential support systems, activation of human social systems, and integration of technological synergy systems.

Regional Ecological Restoration and the Safety Bottom Line

National land ecological restoration is a systematic project [15]. It requires a comprehensive spatial intervention framework spanning from macro-level baseline management to micro-level ecological enhancement. The goal is not only to curb ecological degradation but also to create a more resilient, safe, and healthy ecosystem capable of continuously providing ecological products and services—thereby ensuring the sound development of other human settlement systems and achieving "ecological restoration and green development."

Conduct systematic planning based on natural geographical units such as river basins and oases. Scientifically identify, strictly delineate, and rigorously adhere to ecological protection red lines, incorporating key ecological function zones and sensitive, vulnerable areas into mandatory

protection zones. Embrace the systemic concept that "mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasslands, and deserts form an integrated community of life." Considering the diversity of ecological types in border regions, establish three control lines: ecological protection red lines, environmental quality baselines, and resource utilization ceilings. Implement key ecological projects in border regions to advance integrated ecological protection and systematic governance [16]. Establish a structurally complete and functionally stable regional ecological security network, setting a baseline for rural development.

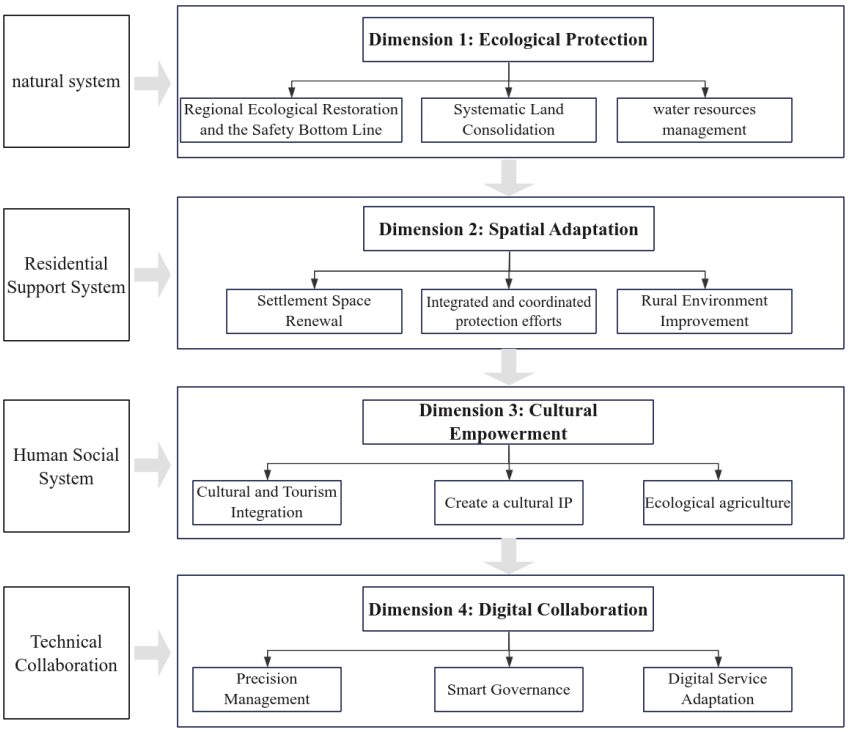


Figure 4. Schematic diagram of sustainable practice pathways. Drawn by the author.

Results and Discussion

Systematic Land Consolidation and Water Resource Management

Systematic Land Consolidation

Conduct comprehensive land consolidation across the entire territory to optimize and adjust the spatial layout of production, living, and ecological areas, achieving efficient land use and enhanced ecological functions. Establish water resource carrying capacity as the core parameter in spatial planning to determine the appropriate scale and distribution of population, industries, and construction land, guiding settlements to concentrate in areas with relatively superior water resources or high-water efficiency.

We will advance ecological land remediation by systematically restoring and adapting mechanization to fragmented farmland, saline-affected areas, and marginal abandoned farmland resulting from over-development. Employing a community-based participatory approach under integrated ecosystem management, we will intensify efforts to mitigate degradation in saline-affected land restoration, desertification control, land rehabilitation, ecological conservation, and

afforestation, thereby achieving optimal overall ecological balance [17]. Concurrently, we will establish farmland shelter-belt networks to improve micro-climates (Figure 5), promote ecological space integration through village consolidation and construction land reclamation, gradually phase out human activities in ecologically sensitive zones, and connect fragmented forest and grassland patches into a cohesive green infrastructure network that encircles or interconnects rural areas.



Figure 5. Systematic land consolidation. Image source: Internet.

Water Resources Management

At the basin level, establish and strictly adhere to the upper limits for water resource development and utilization, then break them down progressively to prefectures, counties, cities, and even townships, thereby forming a comprehensive total water use control indicator system covering the entire society. The approach should shift from simply determining water supply based on demand to a strategy of balancing water supply and demand grounded in enhanced demand management [18]. Priority should be given to safeguarding river ecosystems and ensuring drinking water safety for urban and rural residents; on this basis, agricultural and industrial water quotas should be dynamically optimized according to each prefecture's primary functional positioning, resource endowment, and efficiency levels.

Promote water-saving agricultural practices such as drip irrigation and sprinkler irrigation to enhance agricultural water utilization efficiency [19]. Concurrently, implement modernization upgrades to farmland water conservancy projects. Establish a corresponding precision water management system—including smart metering, quota management, and water rights trading—to ensure that water-saving technologies translate into actual water conservation, preventing the "water-saving effect" from being offset by expanded irrigation areas.

Leveraging modern information technology, we enhance the precision, intelligence, and coordination of water resource management. By integrating multi-source data from meteorology, hydrology, agriculture, and municipal sectors, we establish digital twin river basins and smart water networks to achieve comprehensive intelligent monitoring, forecasting, early warning, optimized scheduling, and emergency management across the entire water supply chain from source to end-user. A transparent platform for water rights confirmation, registration, and trading is established to facilitate inter-regional, inter-industry, and inter-user water rights transactions. Through mobile applications and other channels, water condition information is made public, water conservation services are provided, and public participation and oversight channels are

expanded, fostering a collaborative water governance framework involving the government, market, and society.

Adaptive Renovation of Settlement Spaces

The adaptive renewal of settlements must address the current inefficiencies in residential and support systems and their incompatibility with modern production and lifestyle practices. Through rational planning and design, the natural environmental foundation and regional cultural characteristics should be transformed into efficient spatial configurations and rural landscapes, shifting from passive adaptation to active integration with the environment to achieve harmonious coexistence between humans and nature. A resilient residential and support system that responds to climate change, conserves resources, and preserves cultural continuity should be proactively established.

Coordinated and Contiguous Layout of Rural Spaces

The village has transitioned from a traditional layout pattern constrained by water resources to an intensive model based on modern, efficient water resource allocation and ecological security. Guided by the principle of "land use determined by water availability," this transformation integrates comprehensive land consolidation, defines village construction boundaries, and restricts the uncontrolled expansion of residential activities within ecologically sensitive zones. Population and development activities are directed toward central villages or communities with well-developed infrastructure and relatively superior water resources, forming integrated clusters with mixed functions and shared services to achieve coordinated, contiguous conservation.

The village's spatial structure has been optimized by drawing on the wisdom of traditional settlements in mitigating wind, sand, and sunlight exposure. A clustered, enclosed layout has been adopted, where building clusters provide mutual shading, creating an effective microclimate zone that protects against wind and sand. The streets and alleys between buildings also account for the prevailing summer wind direction to enhance ventilation while avoiding winter wind directions, ensuring a comfortable living environment for residents.

Rural Environment Improvement

Waste management constitutes a fundamental project for rural environmental improvement, aimed at enhancing village aesthetics, ensuring ecological security, and elevating public health standards. Establishing a waste transfer system tailored to regional characteristics represents a systematic endeavor that integrates spatial adaptability, technological suitability, economic feasibility, and coordinated management, thereby controlling domestic pollution at its source and preventing secondary damage to soil and water bodies.

Following the "household sorting–village collection–township transfer–county processing" model [20], a scientific and efficient waste collection and transportation system will be established. Pilot programs will implement source sorting and reduction of recyclable and organic waste to achieve resource recovery. Transfer stations will be designed to meet the temporary storage and compression transfer needs of their service areas. In arid regions, low-cost, low-maintenance sun composting technology will be actively explored for organic waste treatment; in areas with high fuel costs, low-temperature pyrolysis or carbonization technologies suitable for small-scale waste can be piloted to achieve both waste reduction and resource recovery. Currently, the Xinjiang region has implemented various efficient waste disposal methods (Table 2).

By adopting the sponge village concept to harness natural drainage forces and employing Low Impact Development (LID) technologies for decentralized treatment of non-point source wastewater at its source, water quality is purified [21]. Ecological restoration techniques are

integrated into rural development to enhance ecological resilience, with efforts to establish rainwater management and microclimate regulation systems. Leveraging topographic elevation differences, facilities such as ecological ditches, infiltration ponds, and reservoirs are designed to collect and store rainwater and snowmelt for landscaping and sanitation purposes. Additionally, drought-resistant plants are used for village greening, while some roads are replaced with permeable surfaces instead of hard pavements.

Table 2. Xinjiang's efficient waste disposal model

Governance Model	Core Ideology	Representative Case	Key Achievements
Reduction through source-based classification	"The trash doesn't leave the village."	Ruoqiang County (Intelligent Recycling)	The wastewater resource utilization rate in Ruoqiang County has reached 80%.
Technology-Driven Processing	Applications of "Low-Temperature Magnetization"	Baojiadian Village, Manas County (Enterprise Operation)	Process 200 tons of waste to produce 1 ton of magnetized ash suitable for landscaping applications.
Professional Centralized Processing	A three-level coordination mechanism involving "Household, Village, and City"	Jiujianlou Township, Wusu City, Tacheng Region (Integrated Urban and Rural Sanitation System)	With a daily processing capacity of 10 tons, it effectively addresses waste collection challenges.
Institutional innovation activates progress.	"Small Points" Drive Comprehensive Governance	Er Gong Town, Jimusaer County; Jinhua New Village, Wensu County; Awati County (point redemption)	Dashi Tou Township generates an annual revenue of one million yuan through services provided to surrounding areas.
Cycling of Agricultural Resources	"Turning Waste into Gold"	The 6th Division of the Corps and the 12th Regiment of Southern Xinjiang (drip irrigation tapes, residual film recovery)	The 9th Division converts hundreds of tons of livestock manure into high-quality organic fertilizer, while processing residual plastic films into recycled plastic pellets.

Cultivation of Regional Characteristic Industries

Scientifically cultivate leading industries

At the 2026 China Two Sessions, the government work report proposed "promoting high-quality development of the cultural and tourism industry and enriching integrated sectors such as culture, tourism, sports, and commerce," providing crucial policy guidance and strategic

opportunities for rural development in the arid regions of Xinjiang. It is essential to establish a vibrant, sustainable, and inclusive endogenous economic system to address long-standing challenges including a single industrial structure, low added value, and insufficient endogenous momentum. This involves transforming ecological constraints into quality advantages and converting cultural resources into core product strengths.

Based on a profound understanding and scientific assessment of regional resources, the industrial system is established in accordance with the dual principles of "ecological suitability" and "cultural uniqueness", strictly adhering to water resource red lines and ecological carrying capacities, with a focus on developing distinctive ecological agriculture characterized by high water productivity, high added value, and environmental sustainability.

Xinjiang proposed the overall agricultural development strategy of "stabilizing grain production, adjusting cotton cultivation, optimizing fruit cultivation, and promoting animal husbandry" [22]. By adjusting the path of industrial upgrading, expanding the planting areas of coarse grains, specialty crops, and forage grasses, strengthening the regional specialization advantages of cotton and specialty forestry and fruit industries, and advancing the development of agricultural functional zones and advantageous production areas.

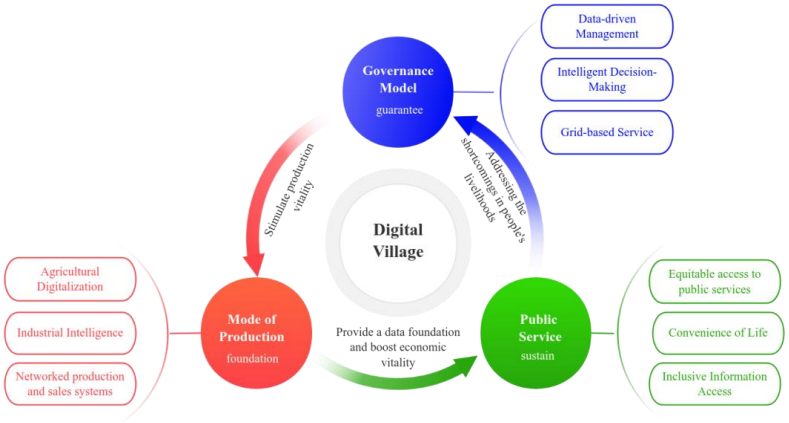


Figure 6. Digital Village Analysis Map. Drawn by the author.

Digital technology enables system collaboration

Building a new type of digital countryside represents an innovative model for social management under current circumstances. By fully leveraging the integrated application of next-generation information technologies such as the Internet of Things, cloud computing, and the internet, we aim to create a digital countryside that integrates security, management, services, and cultural elements. Essentially, this involves the deep integration of digital technologies into rural socio-economic systems, driving systemic transformations in governance models, production methods, and public service frameworks. This process follows an evolutionary trajectory from data resource utilization to intelligent resource management (Figure 6).

Confronted with inherent challenges such as vast geographical expanses, dispersed resources, extensive management coverage, and information asymmetry, traditional rural governance approaches have proven inadequate. As a core element of new-quality productive forces, digital technology offers systematic and precise solutions by deeply integrating it into all subsystems of the rural living environment. This enhances governance accuracy, service efficiency, and

development resilience, facilitating the transition from traditional management to modern "smart governance."

For instance, promote the application of data in planning and management by leveraging the GIS platform to centrally manage ecological protection red lines, village planning, construction projects, and industrial layouts, enabling precise spatial control and dynamic assessment. The planning framework incorporates promptly updated land use status data, ownership information, and a comprehensive GIS "single map" management system [23].

In cultural and tourism development, real-time monitoring of visitor flow density at scenic spots can be achieved by integrating data from surveillance cameras and mobile signaling systems, enabling dynamic crowd management to prevent ecological overload and safety incidents, thereby realizing "smart visitor flow management." Regarding technological tool development, "age-friendly" applications incorporating voice interaction, video guidance, and large-font displays should be promoted to lower usage barriers. In multi-ethnic regions, the provision of bilingual digital content and interface design must be enhanced to ensure cultural compatibility of digital services. By integrating digital skills training with industries requiring digitalization—such as e-commerce operations and tourism services—villagers can transition from mere "spectators" to active "participants" and "beneficiaries" of the digital era.

Conclusion

This study adopts the framework of Human Settlements Science to systematically examine the practical challenges and potential solutions for sustainable rural development in the arid regions of Xinjiang. The research reveals that the core obstacle to rural revitalization in these arid areas lies in the "structural imbalance" among five subsystems—natural, human, social, residential, and supportive—and the resulting complex vicious cycle. To address this challenge, the paper proposes a revitalization approach guided by the principles of "ecological protection, regional adaptation, cultural empowerment, and systemic synergy," and establishes an integrated implementation strategy encompassing protection, adaptation, empowerment, and collaboration.

First, based on regional ecological restoration and the bottom-line management of water and soil resources, establish a solid natural foundation for rural development in arid areas by delineating ecological red lines, advancing comprehensive land consolidation across the region, and implementing refined water resource management in river basins. Second, leverage adaptive renewal of settlement spaces, promote integrated and contiguous village protection alongside the deployment of modern green infrastructure to create resilient living environments adapted to arid climates. Third, driven by the development of regional characteristic industries, transform multicultural ethnic resources and ecological conditions into distinctive industrial IP, fostering an inclusive and mutually beneficial endogenous economic system. Fourth, supported by digital technology-enabled system collaboration, establish a smart governance platform to overcome geographical barriers and information asymmetry, ensuring precise implementation and dynamic adjustment of various strategies.

The aforementioned strategic framework aims to break the vicious cycle of "ecological degradation—economic stagnation—social weakening" in rural areas of arid regions, exploring a sustainable revitalization path that balances ecological security, cultural continuity, economic viability, and efficient governance. It also serves as a valuable reference for rural development in other ecologically fragile areas.

Acknowledgment

National Natural Science Foundation of China Project: Research on the Historical Evolution and Value Assessment of Oasis Settlement Heritage in Arid Regions from a Landscape Archaeology Perspective – A Case Study of the Tarim River Basin. Project Number: 52468004

The contribution of the authors

Saierjiang·Halike – concept, methodology, resources, data collection, testing, visualization, interpretation, drafting, editing, funding acquisition.
Wei Tangzhi – data collection, testing, visualization.

References

1. X. Li, "Cultivating talent literacy for rural revitalization,"*Village Committee Director*, no. 04, pp. 88–90, 2026.
2. C. Wang, "Research on optimization strategy of rural human settlement spatial environment at county level under the goal of ecological livability," M.S. thesis, Dept. Architecture Urban Planning, Anhui Jianzhu Univ., Hefei, China, 2025, doi: 10.27784/d.cnki.gahjz.2025.000067.
3. National Forestry and Grassland Administration, "China's desertified land area net decrease of 65 million mu showing good momentum of 'overall improvement and accelerated recovery,'" Nov. 25, 2024. Accessed: Mar. 25, 2025. [Online]. Available: https://www.forestry.gov.cn/.
4. S. Zhu, W. Tuerxun, G. Tang, et al., "Research progress on changes and control measures of saline-alkali land in Xinjiang," *Shandong Agricultural Sciences*, vol. 55, no. 03, pp. 158–165, 2023, doi: 10.14083/j.issn.1001-4942.2023.03.024.
5. Y. Bao, "Exploration of pathways to enhance the political functions of rural grassroots party organizations in Xinjiang," *Agricultural Industrialization*, no. 9, pp. 96–98, 102, 2025.
6. Q. Wang, Y. Du, and X. Ju, "Research on the optimization path of Xinjiang's foreign trade development mode under the background of 'dual circulation,'" *Practice in Foreign Economic Relations and Trade*, no. 11, pp. 15–18, 2021.
7. L. Ma, "Challenges and path selection of cultural construction in Xinjiang's agricultural and pastoral areas," *Seek Truth from Facts*, no. 03, pp. 98–102, 2017.
8. H. Dong, "Research on the evaluation and integration path of the integration level of primary, secondary and tertiary industries in rural areas of Xinjiang," Ph.D. dissertation, Tarim Univ., Alar, China, 2023, doi: 10.27708/d.cnki.gtlmd.2023.000154.
9. X. Tong, "The 'multi-water-source'strategy of water management in traditional villages,"M.S. thesis, Tianjin Univ., Tianjin, China, 2019, doi: 10.27356/d.cnki.gtjdu.2019.002680.
10. X. Zhao, T. Zhang, H. Sun, et al., "Development strategy of Xinjiang pepper industry clustering from the perspective of new quality productive forces," *Northern Horticulture*, no. 12, pp. 141–147, 2025.
11. X. Zhao and S. Sun, "Practical pathways for high-quality development in ethnic regions empowered by the integration of digital economy and real economy," *Heilongjiang Ethnic Series,* no. 01, pp. 97–105, 114, 2026, doi: 10.16415/j.cnki.23-1021/c.2026.01.008.
12. H. Li, "Research on the synergy of land planning and ecological restoration under the

background of rural revitalization," *Ecology and Resources*, no. 07, pp. 69–71, 2025, doi: 10.20260/j.cnki.styzy.2025.07.023.
13. Z. Cheng, S. Yan, L. Guo, et al., "Urban adaptive water governance for territorial spatial planning: Global experience and implications," *Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture*, vol. 42, no. 01, pp. 15–25, 2026, doi: 10.19740/j.2096-9872.2026.01.02.
14. W. Qiang, "Key points of regional design in urban and rural planning," *Building Materials Development Orientation*, vol. 24, no. 01, pp. 16–18, 2026, doi: 10.16673/j.cnki.jcfzdx.2026.0046.
15. X. Yi, C. Bai, L. Liang, et al., "Evolutionary context and frontier progress of territorial ecological restoration research," *Journal of Natural Resources*, vol. 35, no. 01, pp. 37–52, 2020.
16. G. Li, Y. Lin, and R. Wang, "Modernization of borderland governance during the 15th Five-Year Plan period: Development foundation, opportunities, challenges, and practical pathways," *Journal of South-Central Minzu University (Humanities and Social Sciences Edition)*, pp. 1–11, Accessed: Apr. 21, 2026, doi: 10.19898/j.cnki.42-1704/C.20260209.01.
17. F. Li and S. Zhu, "Concept and application of integrated ecosystem management in Hongyue Village, Jingtai County," *Gansu Forestry Science and Technology*, vol. 36, no. 02, pp. 16–21, 2011.
18. C. Liu and Z. Chen, *Assessment of Current Water Resources Status and Analysis of Supply and Demand Development Trends in China*. Beijing, China: China Water & Power Press, 2001, pp. 1–230.
19. X. Ding, J. He, and L. Wang, "Research on inter-provincial water resources utilization efficiency and driving factors considering undesirable outputs: An investigation based on SE-SBM and Tobit models," *China Population, Resources and Environment*, vol. 28, no. 01, pp. 157–164, 2018.
20. D. Wang, "Current situation and countermeasures of rural human settlement environment improvement in Ningxia," *Rural Science Experiment*, no. 19, pp. 53–55, 2025, doi: 10.20264/j.cnki.rse.2025.19.019.
21. X. Zhang, "Research on pollution control technology for initial runoff in rural courtyards," M.S. thesis, Southeast Univ., Nanjing, China, 2018.
22. K. Chen, "Structural reform of agricultural supply side: Reflections on agricultural structural adjustment in four prefectures of southern Xinjiang," *Xinjiang Social Sciences*, no. 06, pp. 52–57, 2019.
23. B. Zou, "Basic logic and conception of spatial planning system reconstruction under the framework of natural resource management," *Planners*, vol. 34, no. 07, pp. 5–10, 2018.

Information about the authors:

Saierjiang·Halike- Professor of College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University: Ürümqi, Xinjiang
Wei Tangzhi- postgraduate student of College of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University: Ürümqi, Xinjiang

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Научная статья https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-73-84

Объекты социальной инфраструктуры в структурных единицах города Астаны (по данным натурных исследований)

Д.Е. Сарсембаева

Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

E mail: dinara5431@mail.ru

Аннотация. Ежегодный рост численности населения в крупных городах Казахстана увеличивает спрос на жилье. Это сопровождается проектированием и возведением новых микрорайонов. Одновременно с этим становится необходимо решение вопросов по обеспечению населения объектами социальной инфраструктуры. Меры по обеспечению возрастающего населения необходимыми условиями для проживания в городе требуют расширения территории города, что в свою очередь подчеркивает важность грамотного планирования его структурных единиц. Целью исследования является изучение особенностей формирования объектов социальной инфраструктуры города Астаны. Рассмотрение административно-территориальных районов города представляет собой процесс изучения принципов сложившихся учреждений обслуживаний по данным натурных исследований, исторических особенностей, а также статистических данных. При этом важно рассмотрение перспективы строительства новых учреждений при развитии городских районов на основе выявленных особенностей. Результатом исследования является выявление особенностей формирования объектов социальной инфраструктуры в планировочной структуре города Астаны. Результаты исследования важно учитывать в планировании административно-территориальных районов при размещении учреждений обслуживания. Административно-территориальные районы города необходимо рассматривать как возможность улучшения условий проживания населения в компактной структурной единице.

Ключевые слова: численность населения, учреждения обслуживания, структурные единицы, селитебная территория, планировочная структура города.

Received 01.10.2025. Revised 29.01.2026. Accepted 30.01.2026. Available online 30.09.2026

* the correspondence author

Введение

Рост численности населения приводит к увеличению потребности в жилье, объектах социальной инфраструктуры города. При этом важно рассмотреть причины, сопутствующие постоянному росту численности населения в городе. Город Астана занимает 79 733 га территории и поделена на шесть административно-территориальных района: Сарыарка, Байконур, Алматы, Есиль, Нура и Сарайшык.

В условиях рыночной экономики 1991 г. – по настоящее время город Астана претерпевает изменения, связанные с численностью населения и расширением его территории. Присвоение статуса столицы значительно увеличило внутренний миграционный процесс в стране (таблица 1).

В настоящее время изменилось количество занятого населения в тяжелых производствах. В меньшей степени тяжелые виды производства выступают в роли градообразующих предприятий. Большая роль в занятости населения городов принадлежит области образования, культуры, управления, искусства. По данным комитета статистики, доля сферы услуг в Казахстане за период с 2010 по 2017 год выросла с 52 до 58% [1,3]. В крупных городах данный показатель выше. Работа населения сосредоточена на территории города в объектах социальной инфраструктуры, что является специфичным сектором экономики.

Таблица1. Численность населения города Астаны [1-7].

№	Год	Численность
1	1989	281 тыс.человек
2	1990	287 тыс.человек
3	1992	298 тыс.человек
4	1999	327 тыс.человек
5	2005	529 тыс.человек
6	2019	1 127 238 тыс.человек
7	2021	1 184 469 тыс.человек
8	2023	1 389 141 тыс.человек

Примечание: составлено на основании данных [1-7].

В мировой статистике выделяют 4 сектора экономики, среди которых первичный (добывающий природные ресурсы), вторичный (перерабатывающий сырье), третичный (сфера услуг) и четвертичный (производство и обработка информации). Большая часть населения развитых стран занята в труде третичного и четвертичного сектора экономики. В данных странах население меньше занято в тяжелой промышленности, и работа находится в объектах социальной инфраструктуры. Вследствие оттока населения из малых городов ежегодно увеличивается население крупных и крупнейших городов Республики Казахстан. Вместе с этим увеличивается нагрузка на объекты социальной инфраструктуры.

Изменения площадей территорий административно-территориальных единиц города связаны с увеличением численности населения. Астана выступает городом, где объекты социальной инфраструктуры активно строятся в соответствии с увеличением их спроса.

Объекты социальной инфраструктуры в структурных единицах города размещаются вблизи крупных магистралей, на перекрестках дорог, образуя центры социальной активности. Данные градостроительные узлы можно развивать, учитывая потребность

каждого административно-территориального района в социальных и инфраструктурных объектах**.**

Астана территориально состоит из нескольких административно-территориальных районов: Сарыарка, Байконур, Алматы, Есиль, Нура, Сарайшык. Район Алматы — административно-территориальная единица города Астаны, образованная 6 мая 1998 года [2].

16 марта 2018 года из части территорий районов Алматы и Сарыарка был образован четвёртый район Байконур. В 2022 году были озвучены проектные предложения по выделению из района Есиль ещё одного Нуринского района [4]. Также в мае 2024 года на заседании маслихата Астаны проголосовали за создание шестого района Сарайшык, разделив район Алматы на две части.

Актуальность исследования объектов социальной инфраструктуры в административно-территориальных районах состоит в необходимости рассмотрения направлений обслуживания в городе, их расположения при анализе натурного обследования.

Цель данной работы – изучить и определить особенности формирования объектов социальной инфраструктуры города Астана. В ходе работы рассматриваются административно-территориальные районы, изучаются объекты социальной инфраструктуры в городе Астане.

Особое значение в исследовании отводится изучению особенностей проектирования объектов социальной инфраструктуры и их размещению.

Тематика исследования предполагает анализ современного генерального плана Астаны. Также большое внимание уделено изучению существующего состояния объектов социальной инфраструктуры административно-территориальных районов.

Научные работы по рассмотрению особенностей социальной инфраструктуры велись также такими учеными, как Корниловой А.А., Хоровецкой Е.М., Лаптевым В.А., Лаптевой И.В., Мамедовым С., Оспановым Т., Сарсембаевой Д. [5,12-14], Тоскиной В.В. [1].

Анализ основных статистических материалов представляют возможность рассмотреть рост численности населения [2,4]. Значительная часть по процессу возведения объектов социальной инфраструктуры описана в трудах Дубицкого А.Ф. [6], Тоскиной В.В. [1].

В современном состоянии большой интерес представляют публикации о принятых границах города и обсуждение вопросов, связанных с формированием региональной архитектуры и объектов социальной инфраструктуры [7-11]. Важные градостроительные аспекты влияния рассмотрены в трудах Караковой Т.В. [14-15].

В разработке статьи приняты во внимание современные подходы в градостроительстве зарубежных стран.

При подготовке статьи рассмотрен вопрос развития объектов социальной инфраструктуры в структурных единицах города. Цель данной работы выявить характерные особенности объектов социальной инфраструктуры города.

Методология.

Изучение данной проблематики построено на основе анализа современного состояния развития города Астана, анализе литературных источников. Натурные обследования социальной инфраструктуры административных районов города Астаны, составленные с учетом их исторического развития.

Натурные исследования административных районов города Сарыарка, Байконур, Алматы, Есиль, Нура, Сарайшык позволили выявить принципы размещения учреждений обслуживания, установить наличие объектов социальной инфраструктуры.

Изучение статистических данных о численности населения позволило установить увеличение учреждений обслуживания в результате увеличения населения. Также материалы включают данные городских и региональных отчетов, архивные данные, материалы проектных организаций.

Анализ текущего состояния социальной инфраструктуры позволяет оценить условия проживания городского населения, функции учреждений, масштаб и проблемы. Это дает возможность разработать дальнейшие рекомендации.

Результаты и Обсуждение

В результате натурного обследования административных районов города Астана (Сарыарка, Байконур, Алматы, Есиль, Нура, Сарайшык) было рассмотрено наличие объектов социальной инфраструктуры и их характерные особенности.

Административный городской район «Сарыарка» является территорией, образованной в результате длительного исторического процесса. Застройку района отличает компактность, единый масштаб улиц, соразмерность зданий, что показывает важность соблюдения данных критериев при размещении объектов социальной инфраструктуры. В данной части города отмечается наличие необходимых учреждений. Часть города будучи историческим центром имеет учреждения обслуживания разного назначения: банки, посольства, университеты (КазАТИУ им. С.Сейфуллина, Медицинский университет Астана, Туран), колледжи, спорткомплексы, поликлиники, школы, учреждения питания и торговли, культуры (музеи, выставочные центры).



Рисунок 1. Здания исторической части города Астаны

Примечание: фото автора (Сарсембаева Д.Е.).

На примере района "Сарыарка" в результате исследования выявлено, что в городе существует нехватка социальной инфраструктуры следующих объектов: детские сады, школы, поликлиники, торгово-развлекательные центры, спортивные комплексы. При этом отмечается не только их малое присутствие в районе, но и невысокое качество обслуживания, что вынуждает все население данного района преодолевать значительные расстояния к другим учреждениям. По сравнению с данной ситуацией район "Байконур" является наиболее отдаленным от таких учреждений, как спорткомплексы, театры, что многократно усиливает потери времени по пути к объектам культурно-бытового

обслуживания.

На рисунке 1 представлена историческая часть города – здания административных районов "Сарыарка" и "Байконур".

Административный район "Байконур" отличается значительным числом учреждений торговли и общественного питания. Однако в районе существует нехватка культурно-досуговых и спортивных учреждений, а также рекреаций. При этом учреждения досуга не учитывают климатические особенности региона, достаточно сильно отдалены учреждения высшего образования. В районе особо видна проблема разобщенности учреждений, нехватка детских садов, отсутствие благоустройства дворов, отсутствие организации единого центра.

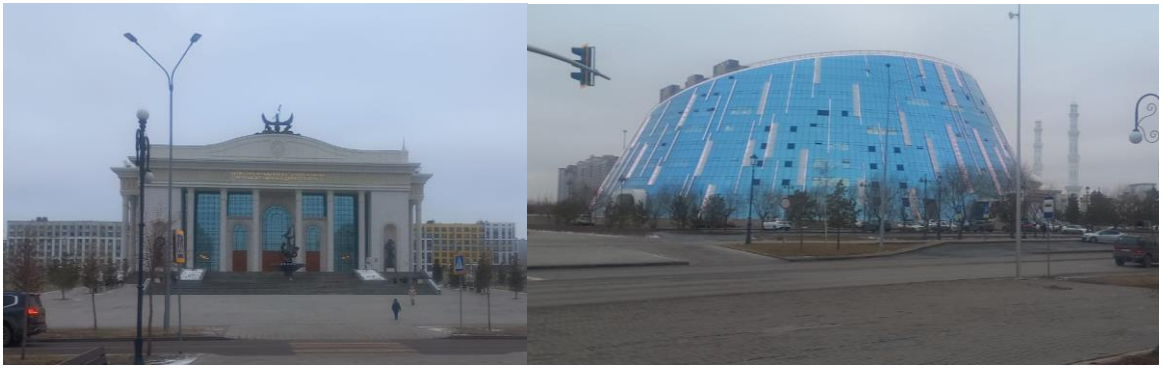


Рисунок 2. Казахский национальный музыкально-драматический театр имени Калибека Куанышбаева, Казахский национальный университет искусств.

Примечание: фото автора (Сарсембаева Д.Е.).

Новый район Сарайшык представлен учреждениями сферы транспорта (Вокзал "Нурлы жол", логистический центр), сферы культуры (Дворец независимости, Дворец мира и согласия, Национальный музей, Казахский национальный музыкально-драматический театр имени Калибека Куанышбаева, Казахский национальный университет искусств). Построенные объекты управления и жилые здания сгруппированы по оси, ведущей от нового вокзала до Дворца мира и согласия. Сосредоточение учреждений района образует градостроительные узлы. Это позволяет организовать доступное обслуживание внутри административного района. Данная формирующая ось участвует в организации эффективного транспортного сообщения для других территорий города. На рисунке 2 присутствуют здания сферы культуры, которые по расположению образуют обширное пространство в административном районе "Сарайшык".

Алматинский район представлен развитой сферой образования (ЕНУ им.Л.Н.Гумилева, колледж ЕАГИ, педагогический колледж Международного университета Астана).

Благодаря активному строительству территория Левобережья, административного городского района «Есиль», образована современными объектами социальной инфраструктуры. Расширение жилищного фонда, увеличение объектов социальной инфраструктуры постоянно увеличивает численность населения в районе. Отделение района "Нура" на основе района "Есиль" позволяет более детально развивать

архитектурно-планировочные решения. Увеличение населения и границ застройки обусловливают необходимость доступности объектов социальной инфраструктуры.

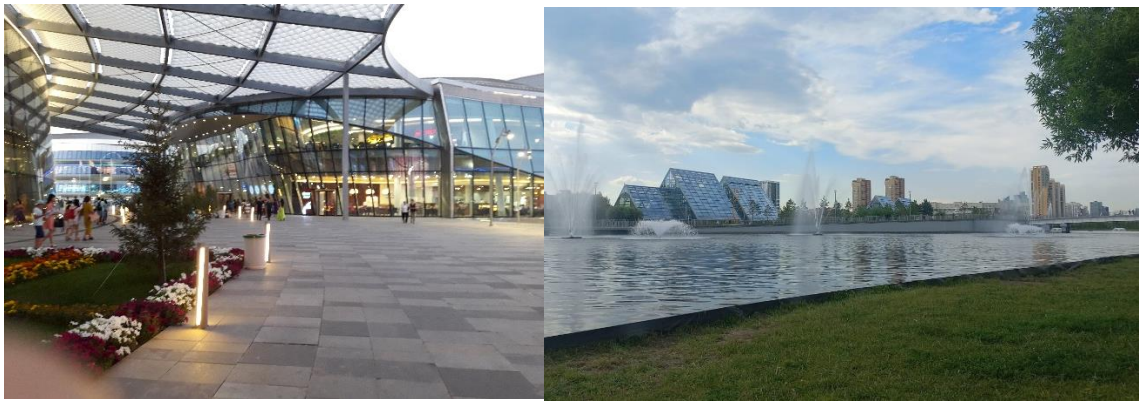


Рисунок 3. Территория "Экспо-2017", ботанический сад.
Примечание: фото автора (Сарсембаева Д.Е.).

Район "Есиль" располагает учреждениями сферы управления, культуры (Дом министерств, музеи, библиотеки, выставочные центры). Большая часть рабочих мест госслужащих находится на данном участке. Также в районе находятся рекреационные пространства, как Водно-зеленый бульвар, ботанический сад. Значительная часть территории района «Нура», отделенная от района «Есиль», сосредоточивает общественные учреждения наряду с жилыми зданиями. На рисунке 3 изображены пространства административного района "Есиль" – территория "Экспо-2017" и ботанический сад.

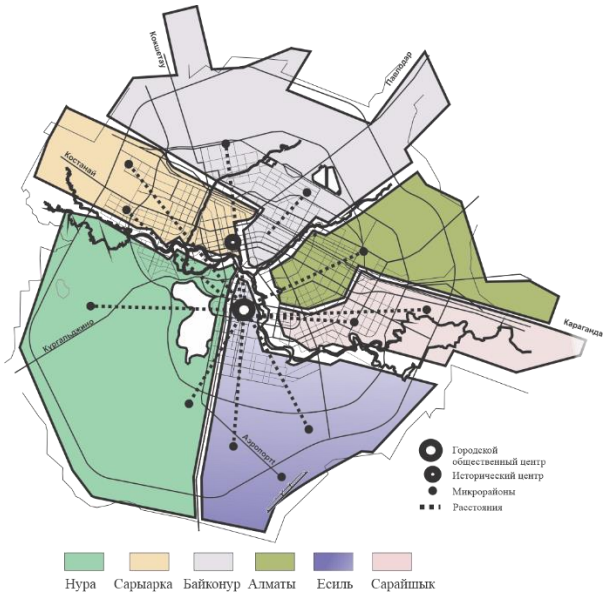


Рисунок 4. Расположение общегородского центра относительно административно-территориальных единиц города Астана
Примечание: составлено на основании данных [2-4, 12]

В административном районе «Нура» расположены крупные учреждения спорта и образования. Инфраструктура спорта представлена зданиями: «Барыс Арена», стадион «Алау», велотрек «Сырыарка», Дворец единоборств им.Ж.Ушкемпирова («Жекпе-жек» сарайы), фитнес-центры. Данные здания сконцентрированы вдоль проспекта Кабанбай батыра. Кроме того по улице Туран размещены объекты социальной инфраструктуры сферы торговли и общественного питания: рестораны, торгово-развлекательные центры «Хан Шатыр», «Сарыарка», «Думан», автосалоны различных марок. Высшие образовательные учреждения, расположенные на данном участке: КазГЮУ им. М.С.Нарикбаева, КазУТБ, Назарбаев университет.

На рисунке 4 представлено расположение общегородского центра относительно административно-территориальных единиц города Астана, по которому можно выявить значительное отдаление объектов социальной инфраструктуры от населения.

Особого внимания заслуживает вновь образованный район «Нура» города Астана. В районе представлены учреждения спортивного, торгового назначения, которые в свою очередь представляют огромную часть общественных зданий. Данные здания обращены на главную магистраль – проспект Туран, что позволяет выделить крупный узел общественных функций. Кроме того, Коргалжынское шоссе является ориентиром для таких объектов, как университет, крупные магазины мебели, рестораны. Поэтому выделение этого района позволит целенаправленно развивать указанные сферы

Сравнивая район «Есиль» до 2023 года с его современным обликом, можно заметить, что прежняя скученность ключевых учреждений мешала развивать отдельные сферы. В связи с этим разделение на два района дает возможность более внимательно сконцентрироваться на развитии данных функций и, следовательно, районов.

При рассмотрении отраслей услуг всех районов выявлено следующее: учреждения располагаются на главных магистралях; учреждения одной сферы услуг группируются на одной территории; нехватка учреждений с комплексным архитектурно-планировочным решением, отсутствие пешеходных связей между зданиями.

В ходе исследования отмечается наличие в городских районах ряда участков, где присутствует связь нескольких сфер услуг, таких как учреждения спорта и образования, учреждения торговли и питания. В структуре городской территории здания формируют градостроительные узлы, совмещающие в себе несколько функций. Данные сочетания функций могут развивать учреждения, улучшая качество обслуживания. Территория города, где присутствуют учреждения спорта, образования и обязательный компонент – торговля, показывает хороший уровень обслуживания. Так, на эту территорию приходится повышенный спрос для частных инвестиций. Помимо обеспечения комфортности проживания, учреждения обслуживания занимают роль предоставления населению рабочих мест самореализации.

Целесообразно выделять городские административные районы и планировать структуру объектов социальной инфраструктуры. При этом нужно учитывать сложившуюся систему обслуживания и особенности учреждений. В каждом городском административном районе необходимо развивать учреждения в составе центра, которые являются ведущими на данном участке города.

В статье рассматривается формирование общественных центров в административно-территориальных единицах города Астаны. Эти факторы важно учитывать при расположении объектов социальной инфраструктуры в структурных единицах столицы.

В результате сосредоточения большого количества учреждений одного направления возникают конкуренция частных предприятий, что стимулирует объекты социальной инфраструктуры улучшать уровень обслуживания, эстетические качества застройки. Зоны влияния данных общественных центров позволяют развивать город на разных участках помимо общегородского центра. Данные градостроительные узлы гармонично развивают территорию структурных единиц города.

Социальное значение формирующихся общественных центров городов постоянно возрастает в процессе прогрессивного развития общества. В связи с этим целесообразно органическое сочетание современного жилища с учреждениями общественного обслуживания, создание во всех городах единой системы обслуживающих учреждений, обеспечивающих комфортные условия для проживающего населения.

В ходе натурного исследования административных районов была выявлена неравномерность объектов социальной инфраструктуры в новых районах. Необходимо отметить, что в городе важно формировать общественные центры с социально-культурными объектами.

В процессе проектирования новых административно-территориальных районов городов важно учитывать существующие учреждения обслуживания, транспортные связи, экологические составляющие. Также данные моменты важно выявлять при обсуждении генеральных планов с населением города и специалистами. Одновременно с социальными задачами важную роль в выборе направления развития архитектуры социальной инфраструктуры играют потребности и оценки населения. Учет таких интересов при выработке направления развития архитектуры социальной инфраструктуры должен обеспечить перспективное видение.

Рост населения отражает увеличение нагрузки на объекты социальной инфраструктуры. Появление новых городских районов сопровождается распределением общественных зданий. Планировочная структура города приобретает новые структурные единицы с зданиями определенного функционального направления.

Заключение

В результате изучения истории города и существующего положения социальной инфраструктуры установлено: с увеличением населения административно-территориальные единицы города (районы) испытывают увеличение нагрузки на учреждения обслуживания; рост населения и территории города требует образования новых районов; административные районы имеют существенные различия по количеству и перечню объектов обслуживания; необходимо развитие градостроительных центров и транспортной связи между ними.

При этом в административных районах выделяется развитие следующих учреждений: в районе «Есиль» – административных и торговых учреждений; в районе «Алматы» – учебных; культурно-просветительных и транспортных – в районе "Сарайшык"; в районе «Нура» – спортивно-зрелищных и учебных учреждений; в районе «Байконур» – торговых учреждений.

В результате исследования существующих административно-территориальных районов выявлено:

1. Необходимо рациональное деление территории городов на административно-территориальные единицы – районы, исходя из численности и площади, что позволят учесть значимые функции в городе.

2. Данные функции объектов социальной инфраструктуры выделяются из экономически развитых территорий.

3. Площадь городского района нужно принимать в зависимости от естественных рубежей, а также целесообразности (направления) архитектуры социальной инфраструктуры.

Данные учреждения сложились в результате развития единого города, что выделило различия в каждом районе. В результате исследования истории социальной инфраструктуры установлено, что различия сферы услуг стали целенаправленно развиваться при разделении города на административные районы. В современное время важно использовать данные отличия как преимущества и специализироваться району на каждом из этих отличительных различий.

При изучении объектов социальной инфраструктуры районов выявлено их не равномерное развитие. Исходя из этого, важно дополнить существующую социальную инфраструктуру в административных городских районах, чтобы способствовать развитию их общественных центров. Данное исследование позволило отследить изменение численности населения, территории города. В связи с этим социальная инфраструктура

Данное исследование позволило отследить изменение численности населения, рост которого привёл к увеличению территории города. В связи с этим социальная инфраструктура крупного города приобрела специфические структурные особенности.

Список литературы

1. Тоскина В. В. Эволюция архитектурно-планировочной структуры. : На примере Акмолинской области: автореферат дис....кандидата архитектуры: 18.00.01.Новосиб. гос.архитектур.-худож.акад. – Новосибирск, 2002. - 28 с.
2. Об установлении границ районов города Астаны – столицы Республики Казахстан. Постановление Правительства Республики Казахстан от 16 марта 2018 года № 131. [Электронный ресурс] –2018. –URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1800000131 (дата обращения 28.03.2025).
3. Астана-Википедиа. [Электронный ресурс] –2025. –URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Astana#%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5. (дата обращения 15.09.2025).
4. Название нового района утвердили в Астане. [Электронный ресурс] –2022. –URL: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/nazvanie-novogo-rayona-utverdili-v-astane-487175/?ysclid=mg248flom8454764375 (дата обращения 21.08.2025).
5. Kornilova A.A., Khorovetskaya Ye.M., Sarsembayeva D.Ye. et al. Territory Management: Urban Planning and Recreational Planning of Populated Areas in the Republic of Kazakhstan in the Second Half of the 20th Century //Journal of Environmental Management and Tourism, 10(6), 1295-1302 (2019), DOI: https://doi.org/10.14505//jemt.v10.6(38).11
6. Дубицкий А.Ф. Пройдемся по улицам Целинограда. – Целиноград: Изд-во Целиноградского областного комитета Коммунистической партии Казахстана, 1990. - 112 с.
7. Туякаева А.К., Данибекова Э.Т., Абдрасилова Г.С., Онищенко Ю.В. Региональная идентичность в архитектуре жилой застройки 1930–1990-х гг. города Караганда//

QazBSQA Хабаршысы. Сәулет. -2023.-№4 (90)-С.62-76. https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-05
8. Abdrassilova G., Danibekova E., Tuyakayeva A., Syzdykova A. Architecture of Almaty in the 20thcentury: in search of cultural identity// QazBSQA Хабаршысы, Сәулет.- 2024.-4(94)-С.8-23.https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.4-01
9. Danibekova E., Abdrassilova G., Daurenbekova R., Abdullayeva N. Modern mosque architecture:abalance between globalization anda sense ofregional identity// QazBSQA Хабаршысы, Сәулет.- 2025.- 2(96)-С.7-19. https://doi.org/10.51488/1680-080X/2025.2-01
10. Uzakbayev Т.К., Nurkusheva L.T. Formation and development of business space architecture// QazBSQA Хабаршысы, Сәулет-2025.- 2(96)- С.50-62. https://doi.org/10.51488/1680-080X/2025.2-04
11. Корнилова А.А., Лаптева И.В. Региональные особенности формирования генеральных планов городов. – Казахский агротехнический университет им. С.Сейфуллина, 2018.
12. Sarsembayeva D.Ye., Kornilova A.A., Zhaksylykova L. A., Kiseleva T. A. Features of the Social Infrastructure Formation of Astana City // Civil Engineering and Architecture 11(3): 1234-1244, 2023 DOI: 10.13189/cea.2023.110309
13. Глаудинов Б. А. История архитектуры Казахстана. Алматы: КазГАСА, 1999.- 295 с.
14. Каракова Т.В. Архитектура и дизайн городской среды в контексте изменения пространственного поведения жителей мегаполисов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки. – 2023. – №. 25, № 2 (89).-С.64-69.
15. Каракова Т.В. Урбанизация и ресурсный потенциал Российского мегаполиса в контексте средового подхода в градостроительстве // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки.-2019.- т. 21, №68.-С.43-47.

D.Ye. Sarsembayeva

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan

Social infrastructure facilities in the structural units of the city of Astana (based on field studies)

Abstract. The annual population growth in major cities of Kazakhstan is accompanied by increased demand for housing. This is accompanied by the design and construction of new microdistricts. At the same time, it becomes necessary to address issues related to providing the population with social infrastructure. Providing the growing population with the necessary living conditions in the city requires expansion of the city's territory, which in turn highlights the importance of structural units in the city's planning structure. The aim of this study is to examine the development of social infrastructure facilities in Astana. The examination of the city's administrative-territorial districts involves examining the principles of existing service institutions based on field surveys, historical features, and statistical data. It is also important to consider the prospects for constructing new institutions based on these identified characteristics. The study reveals the development of social infrastructure facilities within the planning structure

of Astana. These findings are important to consider when planning administrative-territorial districts and locating service institutions. Administrative-territorial districts of the city should be considered as an opportunity to improve living conditions.

Keywords: population, service institutions, structural units, residential area, city planning structure.

References

1. Toskina V. V. Jevoljucija arhitekturno-planirovochnoj struktury naselennyh punktov Severnogo Kazahstana v XIX-XX vv. : Na primere Akmolinskoj oblasti : avtoreferat dis. ... kandidata arhitektury : 18.00.01 [Evolution of the architectural planning structure of settlements in Northern Kazakhstan in the 19th-20th centuries] (Novosibirsk, 2002. 28 p.) [in Russian]
2. Ob ustanovlenii granic rajonov goroda Astany - stolicy Respubliki Kazahstan. Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazahstan ot 16 marta 2018 goda № 131. [On establishing the boundaries of the districts of the city of Astana - the capital of the Republic of Kazakhstan. Resolution of the Government of the Republic of Kazakhstan dated March 16, 2018. № 131] [Elektronnyj resurs] –2018. Available at: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1800000131 (Accessed: 28.03.2025).
3. Astana -Wikipedia. [Elektronnyj resurs] –2025. Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Astana#%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5. (Accessed: 15.09.2025).
4. Nazvanie novogo rajona utverdili v Astane. [The name of the new district was approved in Astana] [Elektronnyj resurs] –2022. Available at: https://tengrinews.kz/kazakhstan_news/nazvanie-novogo-rayona-utverdili-v-astane-487175/?ysclid=mg248flom8454764375 (Accessed: 21.08.2025).
5. Kornilova A.A., Khorovetskaya Ye.M., Sarsembayeva D.Ye. et al. Territory Management: Urban Planning and Recreational Planning of Populated Areas in the Republic of Kazakhstan in the Second Half of the 20th Century //Journal of Environmental Management and Tourism, 10(6), 1295-1302 (2019), DOI: https://doi.org/10.14505//jemt.v10.6(38).11
6. Dubickij A.F. Projdemsja po ulicam Celinograda. [Let's walk along the streets of Tselinograd] (Celinograd,1990. 112 p.) [in Russian]
7. Tuyakaeva A.K., Danibekova E.T., Abdrasilova G.S., Onishchenko Yu. Regional'naya identichnost' v arkhitekture zhiloj zastrojki 1930-1990-kh gg. goroda Karaganda [Regional identity in the architecture of residential buildings in the 1930s-1990s of the city of Karaganda] QazBSQA Habarshysy. [Saulet]. 4(94).62-76(2023). https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-05 [in Russian]
8. Abdrassilova G., Danibekova E., Tuyakayeva A., Syzdykova A. Architecture of Almaty in the 20thcentury: in search of cultural identity// QazBSQA Habarshysy. [Architecture]. 4(94).8-23(2024).https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.4-01
9. Danibekova E., Abdrassilova G., Daurenbekova R., Abdullayeva N. Modern mosque architecture:abalance between globalization anda sense ofregional identity// QazBSQA Хабаршысы, Сәулет. 2(96).7-19(2025). https://doi.org/10.51488/1680-080X/2025.2-01
10. Uzakbayev T.K., Nurkusheva L.T. Formation and development of business space

architecture// QazBSQA Хабаршысы, Сәулет. 2(96).50-62(2025). https://doi.org/10.51488/1680-080X/2025.2-04
11. Kornilova, A. A., & Lapteva, I. V. Regional`nye osobennosti formirovaniya general`nyx planov gorodov. [Regional features of the formation of city master plans] (S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, 2018.) [in Russian]
12. Sarsembayeva D.Ye., Kornilova A.A., Zhaksylykova L. A., Kiseleva T. A. Features of the Social Infrastructure Formation of Astana City // Civil Engineering and Architecture 11(3), 1234-1244 (2023) DOI: 10.13189/cea.2023.110309
13. Glaudinov B. A. Istoriya arkhitektury Kazakhstana. [The history of architecture in Kazakhstan] (Almaty, 1999. 295 p.) [in Russian]
14. Karakova T.V. Arhitektura i dizajn gorodskoj sredy v kontekste izmeneniya prostranstvennogo povedeniya zhitelej megapolisov [Architecture and design of the urban environment in the context of changing spatial behavior of residents of megacities] Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.Social'nye, gumanitarnye, mediko-biologicheskie nauki. [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Social Sciences, Humanities, Medical and Biological Sciences]. 25. № 2 (89). 64-69(2023). [in Russian]
15. Karakova T.V. Urbanizacija i resursnyj potencial Rossijskogo megapolisa v kontekste sredovogo podhoda v gradostroitel'stve [Urbanization and Resource Potential of the Russian Megalopolis in the Context of the Environmental Approach in Urban Planning] Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.Social'nye, gumanitarnye, mediko-biologicheskie nauki. [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Social Sciences, Humanities, Medical and Biological Sciences]. 21. №68.43-47(2019). [in Russian]

Сведения об авторах:

Сарсембаева Д.Е. – автор для корреспонденции, доктор PhD по специальности "Архитектура", и.о.доцента кафедры архитектуры, архитектурно-строительный факультет, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Кажымукана, 13, учебный корпус №6, 10000, Астана, Казахстан, 880111400230, 87015535179

Sarsembayeva D. Ye. – corresponding author, Doctor PhD in the specialty "Architecture", Acting Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Civil Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, st. Kazhymukan, 13, educational building No. 6, 10000, Astana, Kazakhstan, 880111400230, 87015535179

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Article https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-85-96

Comparative analysis of international and national standards in the field of healthcare facilities design.

M. S. Yugay* , **O. N. Semenyuk**

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

E mail: yu.marina.s@mail.ru, ons_31@mail.ru

Abstract. The article is devoted to an analytical analysis of the key principles of designing medical and wellness facilities in accordance with current international standards and requirements (JCI - Joint Commission International, FGI - Facility Guidelines Institute, iHFG - International Health Facility Guidelines). The study examines approaches to the formation of architectural and planning solutions that affect the safety, efficiency, and manufacturability of healthcare facilities. Special attention is paid to the influence of medical technologies, sanitary and epidemiological requirements, and socio-economic factors on the design. The article also shows the difference between national and international approaches. In national practice, a medical institution is more often considered as a civilian building with an established list of regulatory requirements. International standards, on the contrary, proceed from a comprehensive understanding of the hospital as a high-tech facility, where the planning structure is directly related to medical processes.

The research results can be used both by design organizations for a more accurate understanding of the process of developing architectural and planning solutions, and by government agencies for making changes and additions to existing norms and rules due to their inconsistency with modern high-tech processes.

Keywords: design of healthcare facilities, international standards, functional purpose, architectural and planning solutions, factors, architecture, regulatory framework, ergonomics.

Received 07.04.2026. Revised 08.04.2026. Accepted 21.05.2026. Available online 30.09.2026

* the corresponding author

Introduction

The Republic of Kazakhstan has entered an active period of globalization and cooperation in the international arena, and accordingly, this implies the need to review approaches to the design of healthcare facilities.

The rules and regulations for the design of medical infrastructure facilities must comply not only with national but also with international standards that can ensure a high level of safety, energy efficiency, and ergonomics. During the implementation of national healthcare projects, the architectural design of perinatal centers becomes crucial: after all, it is here that the fundamental demographic development and health of the future nation are formed.

Modern challenges in the design of healthcare facilities in Kazakhstan

The Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan dated November 24, 2022 [1] exposes the key problems of the medical infrastructure:

- unsatisfactory state of the material and technical base, including the organization of obstetric care (in 2021 - 76.9%);

- 40% of the buildings of the SES (sanitary and epidemiological service) do not meet the requirements and standards; - low level of material and technical condition of obstetric institutions, their non-compliance with modern requirements, insufficient medical equipment, understaffing, including specialized specialists (obstetrician-gynecologists, anesthesiologist-resuscitators, neonatologists) of maternity organizations;

- insufficient level of integration of PHC (primary health care), maternity and specialized hospitals.

These and many other factors directly affect the quality of medical services, which require advanced and high-tech solutions, infection control, and flexible architectural and planning solutions.

The relevance of the research topic lies in the rapid development of the healthcare system, which is caused by the advent of modern medical technologies, changes in the epidemiological situation in the regions, and increasing demands on the safety of patients and staff. In modern architectural practice, the design of healthcare facilities has ceased to be considered only as the creation of a "civil purpose" framework to accommodate offices that strictly meet the requirements of norms and regulations. Today, the process of designing medical facilities is considered a high-tech process, where spatial solutions directly affect the effectiveness of medical treatment, the psycho-emotional state of patients, and the reliable functioning of the organization.

In the international arena, standards and norms in the field of design, such as JCI - Joint Commission International, FGI - Facility Guidelines Institute, and iHFG - International Health Facility Guidelines, set the direction of the approach from strict subordination to national standards and requirements for Evidence-Based Design (EBD). This method allows you to create architectural and planning solutions based on scientifically proven data on how the environment affects the recovery of patients, the effectiveness of staff, and their safety. At the same time, strict norms and rules in the field of design are in force in the Republic of Kazakhstan, which impose strict restrictions that limit designers in flexible approaches to solving a particular task.

The purpose of this article is to analyze and systematize international experience in the design of medical facilities. The article considers three main directions of development in the field of medical design. The first is related to the transition from traditional divisions of infectious pathways due to the construction of complex corridors to infection control due to modern engineering systems that control airflow and pressure. The second direction concerns the planning structure - instead of rigidly limited areas, it is necessary to apply functional planning solutions

that are formed around the patient's area of activity. The third is the introduction of patient safety principles into the architecture of the building, which are formed according to the analysis of their routes inside the premises.

The results of this analysis can be used to form a further process of improving existing regulatory legal acts in the field of technical regulation of the design processes of healthcare facilities. The company considers the creation of medical facilities not just as civil engineering, but as a way to reduce technological risks during operation.

The methodology

This paper is based on the assumption that the architectural and spatial model of healthcare facilities can have a direct impact on the quality of medical care. When designing hospitals in accordance with international standards, the environment can not only support the medical component of the process, but also reduce the technological risks associated with the operation and maintenance of the building. At the same time, the existing reality of design in Kazakhstan, which is based on a regulatory approach and strict adherence to construction and sanitary-epidemiological norms and rules, often creates limitations in the field of scientific evidence-based design method. It is assumed that the process of transition from fixed limitations in regulatory indicators to adaptive functional modeling, which is used in the Joint Commission International (JCI) standards, will make it possible to adapt modern high-tech standards to the national regulatory framework without compromising the quality of medical care.

To verify this assumption, a comparative analysis of two alternative systems of norms and standards was used as the main material: the JCI international accreditation standards and the national Code of Building Regulations of the Joint Venture of the Republic of Kazakhstan. 3.02-113-2014 "Medical and preventive institutions".

The research methodology included three consecutive stages of analysis. At the first stage, differences in approaches to infection control were considered: from primarily sanitary requirements typical of building codes and regulations in force in the Republic of Kazakhstan to active engineering control applied in JCI standards and based on airflow control and automated pressure management to eliminate cross-infection. The second stage is devoted to a practical approach to the development of functional planning solutions, during which the planning structure is evaluated in terms of the actual work processes of medical personnel, and not only in terms of regulatory limited areas. At the third stage, using the method of analyzing the patient's route, problematic flow intersections within the perinatal center were identified, potentially affecting the safety and quality of medical care.

The applied analysis algorithm allows us to consider the design process of medical institutions not only as a civil engineering facility, but also as a complex system in which architecture is directly related to medical and technological processes. A comparison of the requirements of the building codes and regulations of the Republic of Kazakhstan with the safety criteria set out in the JCI standards provides a clear understanding of the existing regulatory constraints and provides a basis for developing recommendations for updating the national design system for medical institutions.

Findings/Discussion

In the course of a comparative analysis of the national building codes of the Republic of Kazakhstan (CH and JV RK) and the international standards of the Joint Commission International (JCI) and Facility Guidelines Institute (FGI) in the field of healthcare facilities design, fundamental

differences have been identified that go beyond the simple discrepancy of individual technical parameters. These differences were identified as conceptually different approaches to understanding the role of an architect and the very essence of architectural design at the stage of developing architectural planning and spatial solutions for medical institutions.

The identified discrepancies reflect not only differences in technical requirements, regulatory indicators and qualitative characteristics of the designed premises, but also affect the methodological approach to the design process itself. This approach determines the nature and depth of the relationship between the professional activity of an architect, the medical and technological process of providing medical care and key issues of ensuring the safety of patients and medical personnel in modern conditions of functioning of healthcare institutions.

Conceptual foundations of design: building volume vs technological process

Based on the results of the analysis, it was determined that the key difference between national and international standards lies in defining the primary design task and understanding the main function performed by various healthcare facilities. In Kazakh practice, medical institutions have historically been considered as one of the types of civil buildings with certain sanitary and epidemiological requirements, where priority is given to the reliability of the building and compliance with the requirements of regulatory documents [2, 3]. These standards pay considerable attention to the location of the building, fire and sanitary gaps, escape routes, minimum requirements for the area of the premises - parameters that are undoubtedly important for the safety of the building as an object of the structure, but ineffectively affect medical processes and the quality of medical care.

The functional zoning of departments is mainly reduced to a formal division into "clean" and "dirty" zones without a detailed study of the logistical intersection of staff, patients and technological equipment, which does not allow effective management of the risks of nosocomial infections and medical errors. On the contrary, international practice defines a hospital as a complex high-tech system, where the architecture of the facility is subordinated to the medical process and the patient's safety objectives [4, 5]. The main tool is the Patient Journey Mapping method [6], in which the design begins with an analysis of all possible paths of movement of the patient, staff, equipment and materials. Each functional planning structure is evaluated in terms of the risk of medical error, which is directly related to the concept of patient safety, described in detail in the report of the US Institute of Medicine "To Err Is Human", which emphasizes the role of the physical and organizational environment in preventing errors [7]. In which, the architecture of the building is considered an active component of the patient safety system, which can not only reduce but also increase risks depending on the quality of design solutions.

This difference forms the different functions of an architect at the design stage: in national practice, he acts as a "translator" of building regulations and the creator of an architectural image; in international practice, a coordinator of medical processes and technological risks, an active participant in the formation of clinical processes through architectural and planning solutions. A good example is the placement of hand hygiene sinks, one of the most important elements of infection control. In the CH and SP RK, this is a conditionally defined plumbing point without a specific indoor location requirement, provided that the minimum quantity is met. In the JCI and FGI standards, the sink is considered an important safety unit and should be located in the direct line of sight of the doctor before contact with the patient, which reduces the likelihood of violation of infection control procedures by 30-40% according to research data [4, 5]. The architecture of the surrounding space "encourages" staff to behave safely, reducing the impact of stress factors on cognitive activity, and turning the right action into the most natural and convenient [8]. This

principle of "design for safety" is reflected in all aspects of international standards and is fundamentally different from the conventional approach of national standards.

Criteria	National standards	JCI/FGI
Methodology	Prescriptive method (fixed indicators)	Functional approach (derived from technology)
The area of the ward per 1 bed	12 m2 (fixed)	Calculated based on the equipment and areas of activity
Area of the operating room/intensive care unit	Legally limited	Up to 70-80 m2 when using high-tech equipment
Accounting for modern equipment	Limited by the standards of the mid-20th century	Adaptable to technological development
Justification of the area	Formal compliance with standards	Functional areas and clinical scenarios
Flexibility in expertise	Excess of the norm = rise in price	Reasonable increase for safety and effectiveness
Consideration of staff ergonomics	Minimal	A key design factor

Table 1. Comparative analysis of methods for determining the area of premises

Methodology for determining the area of premises

The comparative analysis revealed key differences in the methods of determining the area of the premises, which demonstrate different approaches to the functioning of the medical space. International recommendations use a functional approach, in which the area of the room is determined depending on the technological process and the dimensions of the equipment. The fundamental factor in determining the quantitative size of the area is the "activity zones", which include the patient's area, staff circulation, equipment placement, and family involvement, especially relevant for intensive care units and perinatal centers [4]. This method makes it possible to justify an increase in the area of premises to 70-80 m2 for operating rooms or intensive care rooms during the use of high-tech medical equipment, ensuring the transition to technological development and changes in the treatment and diagnostic process. This takes into account not only the dimensions of the equipment, but also the ergonomics of the space for staff to work, the need for emergency access to the patient from different sides, the placement of monitors in the field of view, and additional space in the room for relatives to participate in the treatment process.

The fundamentals of the Joint Venture and the National Assembly of the Republic of Kazakhstan apply the method of directive indicators based on fixed areas of premises established several decades ago. Especially in the field of spatial planning solutions for medical institutions, this is the legacy of the Soviet rationing school of the 1970s and 1980s. The area of an adult patient's room per bed is normatively fixed at the level of 12 m2 (with an airlock, toilet, and

shower) [2], which reflects the parameters of the equipment of the mid-20th century. Modern high-tech medical equipment often does not fit into these dimensional limitations, creating critical situations when emergency access to the patient is required. At the same time, exceeding the standard area during the state examination is perceived as an unjustified increase in the cost of the project, which puts the architect in a difficult situation - to comply with the norms or ensure the functionality of the premises. As a result, the architect has to "integrate" modern technologies into outdated spatial constraints, which reduces ergonomics, increases the risk of errors and creates uncomfortable conditions for staff and patients.

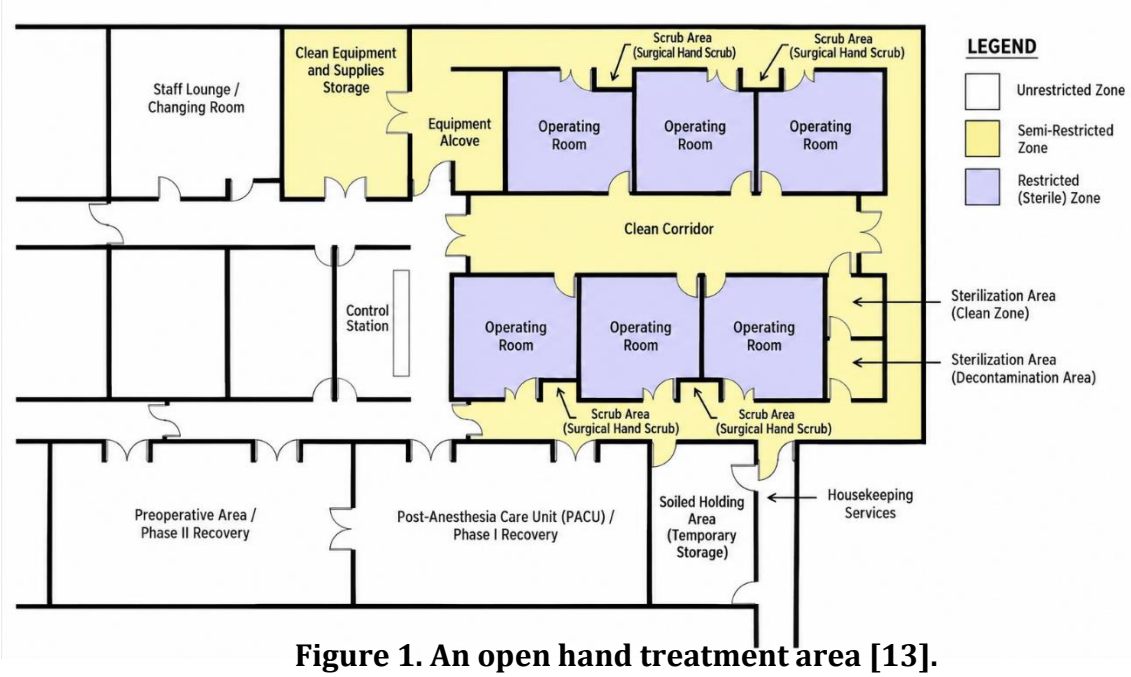


Figure 1. An open hand treatment area [13].

Research in the field of "evidence-based design" confirms that the internal organization of space directly affects the safety and effectiveness of treatment, and a well-designed architectural and planning structure reduces staff stress and the number of medical errors [9]. In the context of the above facts, a strict metric approach within the framework of national norms and regulations assumes a high level of risk of obsolescence and non-compliance with modern requirements of clinical practice, while the functional model of FGI provides flexibility and adaptability to technological development of processes (Table 1).

Organization of operational units in the context of isolation and optimization of processes

The differences are most evident when comparing approaches to the design of operating units, which are the most technologically complex and especially important areas of a medical facility from the point of view of increased security. The current sanitary and building regulations of the Republic of Kazakhstan preserve the ideology of strict spatial separation into "sterile" and "dirty" zones organized through separate corridors, stairs and elevators. This structural model goes back to the origins of the Soviet normative school of design of the 1960s and 1970s and assumes that infection safety is achieved primarily by architectural isolation of flows [10, 11]. To build a medical waste disposal system, it is necessary to provide separate "dirty" corridors and elevators; this approach leads to a complication of the planning structure of the operating unit and a significant increase in the total area of the building. Based on the results of the evaluation of design practice

and the analysis of implemented projects, these solutions can increase the construction volume of the facility by 15-20% [12], which significantly increases financial costs without proven improvement of clinical processes. On the other hand, the requirement to set up enclosed spaces for preoperative hand treatment by personnel [2, 3] leads to a quantitative increase in rooms and complicates the layout of the operating unit (Figure 2). According to FGI, it is recommended to design open niches for the treatment of staff hands, embedding them in the operating room space. This solution reduces long logistical routes for staff movement and opens up the possibility of constant monitoring of processes in the operating room (Figure 1).

According to international standards (FGI, JCI), the sterility of the operating unit is considered as a result of the interaction of architecture, engineering systems and operational protocols, where each element plays its key role in ensuring safety.

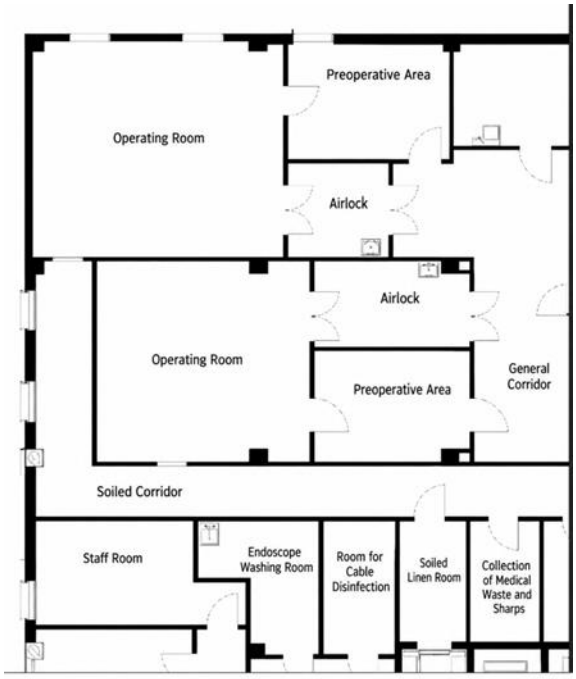


Figure 2. Two-corridor solution of the operating unit (design materials of the author).

In modern Western medical institutions, this issue is solved through a system of closed containers, vacuum or pneumatic transportation, as well as hermetically sealed trolleys with clearly delineated routes and operating regulations. As a result of this approach, the transportation of "dirty" materials is allowed along common corridors without the risk of cross-infection, since safety is ensured not by walls, but by packaging technology, transportation, and operational requirements. Scientific research [9] proves that the key factor in preventing cross-contamination is not the presence of a separate dirty corridor, but the frequency of door openings and the organization of staff movement. With a single-corridor planning structure, when medical waste is packed inside the operating room, the number of exits to the corridor is reduced. This makes such a system safer compared to a two-corridor system, where staff movement is more chaotic.

Building life cycle cost analysis: capital and operating costs

One of the key differences between the domestic and international regulatory frameworks is the approach to financial and economic assessment of design solutions throughout the entire life

cycle of a building. In Kazakhstan's design practice, priority is traditionally given to minimizing CapEx (Capital Expenditure) - capital expenditures during the construction phase. This is manifested in strict control over not exceeding the cost per square meter [14], optimization of architectural, planning and design solutions, rejection of complex facade systems, as well as the choice of budget finishing materials and engineering equipment. When designing hospitals on a government order, the customer, limited by tight budget limits and procurement procedures at the lowest price, is forced to give priority to reducing initial costs. This systematically leads to a balancing act between the choice of engineering equipment, high-quality building materials and architectural solutions, which further negatively affects the operational reliability and durability of healthcare facilities. Energy efficiency of a building is often considered as a technical task implemented at the final stages of design by selecting equipment, and the architectural shape of the building, the orientation of the facades and the planning structure are rarely analyzed in terms of energy consumption and adaptation to climatic conditions.

Parameter	National standards	JCI/FGI
Priority	CapEx (capital expenditures)	OpEx (operating costs)
Share of operating costs	It is not taken into account in the design	70-80% of the cost for 30-40 years
The cost approach	Minimizing the cost of m2	Life Cycle Cost (LCC)
Energy efficiency	An engineering challenge in the late stages	Integrated into the architecture from the early stages
Energy saving	Conditionally regulated	Up to 40-50% compared to the baseline
Selection of materials	Minimum cost, frequent repairs (3-5 years)	High wear resistance, durability (15-25 years)
Climate adaptation	The initial condition for calculations	The formative factor
Design Philosophy	Compliance with formal standards	Long-term cost optimization
Planning horizon	1-5 years	30-40 years

Table 2. Comparative analysis of economic approaches

The choice of materials is focused on compliance with sanitary requirements and minimum

cost, which often leads to the need for frequent cosmetic repairs every 3-5 years, increasing operating costs and disrupting the work of medical institutions, creating inconvenience for patients and staff.

International design standards, on the contrary, are based on the concept of Life Cycle Cost (LLC, life cycle cost) and focus on optimizing OpEx (Operating Expense) - operating expenses during the operation of the facility. Research by the Whole Building Design Guide [15] and Life Cycle Cost Analysis (LCC) [16] proves that operating costs (OpEx) exceed 3.6 times the initial investment in design and construction for modern buildings with an estimated service life of 60 years. Taking this approach into account, the architect acts not only as the author of a spatial planning solution, but also as a strategist who calculates the long-term economic efficiency of each decision. Higher initial investments in energy-efficient facade systems, high-quality engineering equipment and durable materials pay off with significant reductions in operating costs and increased comfort for patients and staff (Table 2).

Energy efficiency is integrated into architectural design from an early stage. Climate is considered as a formative factor determining architectural typology, and not only as a starting condition for engineering calculations. It is recommended to use materials with high wear resistance and long service life (for example, HPL panels with a 15-20-year warranty, homogeneous floor coverings with a service life of up to 25 years), which retain functional and aesthetic characteristics for decades and reduce total costs during the life cycle of a building by 30-40% compared to budget counterparts. requiring frequent replacement.

Thus, the difference between regulatory systems lies not only in specific numerical parameters and requirements, but also in the fundamental design philosophy that defines the role of the architect, the planning horizon and criteria for making design decisions.

Functional planning solutions and operational efficiency

A comparative analysis revealed significant differences in the approach to the organization of functional relationships within medical institutions, and these decisions directly affect the effectiveness of staff and the quality of medical care provided. National standards focus on compliance with areas and the isolation of functional planning areas, while analyzing the internal logistics of personnel, optimizing work processes and ergonomics of medical activities often remain outside the regulatory framework. This leads to the formation of long corridors, remote placement of office premises and inefficient organization of work areas, and this results in increased physical strain on staff and response time to patient requests (Table 3).

International design standards actively use the concept of evidence-based design, which examines real-world scenarios of building operation using timekeeping, video surveillance, and staff surveys. One of the main parameters is the "nurse's path" - the distance that medical personnel travel during a shift between wards, posts, auxiliary rooms and storage areas. Studies show that in traditionally designed departments, a nurse can walk up to 4-6 km per shift, and as a result, increased physical fatigue and a decrease in the quality of medical care for patients at the end of a work shift [17].

Reducing the distances between key functional points increases staff efficiency, reduces fatigue and the likelihood of errors by up to 20% [17]. From an architectural point of view, this is achieved through compact planning schemes (for example, radial or group configurations instead of corridor ones), the rational placement of nursing posts in the geometric center of the department with the possibility of visual monitoring of all wards, the decentralized placement of storage and preparation areas for medicines, as well as the rejection of excessively long corridors.

As a result, the difference between standards lies not only in numerical indicators of areas and

distances, but also in the project philosophy, which defines the role of the architect in the decision-making process - from the author of the interpretation of regulatory requirements to the designer of high-tech workflows and an active participant in the formation of a model of medical care.

Aspect	National standards	JCI/FGI
The concept of sterility	Architectural isolation	Managed process (engineering+protocols)
Waste disposal	Separate "dirty" corridors and elevators	Closed containers, pneumatic transport, common corridors
Increase in construction volume	+15-20% due to duplication of communications	Optimization through technology
Preoperative hand treatment	Closed boxes	Open areas with controlled ventilation
Ensuring sterility	Spatial separation	Laminar flows, pressure monitoring, monitoring
Flexibility of layout	Rigid structure	High (compact, adaptable)
Evidence base of effectiveness	Tradition, historical experience	Clinical trials

Table 3. Comparative analysis of approaches to the design of operational units

Conclusion

At the state level, Kazakhstan recognizes the need for a transition to international standards and the unification of national standards with the requirements of JCI and FGI. The "Concept for the development of healthcare infrastructure for 2024-2030" notes that JCI requirements should be taken into account already at the design stage, since it is the requirements that contribute to ensuring the systemic quality and safety of medical services [1]. This indicates the importance not only of the architectural form, but also of the technological process and the recognition of the need to synthesize the principles of functional design and patient safety into national standards. In turn, in practice, this transition may face a number of barriers: lack of methodology for implementing international standards into the national regulatory framework, insufficient training of designers in the field of evidence-based design, resistance from expert organizations using more traditional

approaches in their work, as well as economic constraints associated with higher initial investments in the application of international standards.

Based on the results of the comparative analysis, it is confirmed that the differences between JV/CH RK and JCI/FGI standards are systemic in nature and cover all aspects of design - from conceptual foundations to the application of specific technical solutions. International practice considers architecture as a risk management tool and support for the medical process, while the domestic regulatory framework is still focused on limiting construction parameters and formal compliance with requirements. The transition from a space-oriented to a process-oriented approach to design requires not only updating the regulatory framework, but also changes in the professional qualifications and methodology of architectural design in the field of healthcare, including the introduction of an integrated approach involving medical practitioners and consultants at all stages of design. The integration of the principles of functional and spatial design, evidence-based design and the concept of Life Cycle Cost into national standards is a key condition for improving the quality of design and efficiency of healthcare facilities in Kazakhstan, as well as a necessary step to achieve an international level of quality of medical care and patient safety.

Contribution of the authors:

Yugay M.S. - research concept, collection and processing of materials, data analysis and writing of the text of the article.

Semenyuk O.N. **-** scientific guidance, critical revision of the content and approval of the final version of the manuscript.

References

1. Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazahstan ot 12 ijunja 2024 goda № 454 «Ob utverzhdenii Koncepcii razvitija infrastruktury zdravoohranenija na 2024-2030 gody» // Oficial'nyj internet-portal pravovoj informacii. - URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2400000454 (data obrashhenija 06.12.2025 g.) - jelektronnyj resurs
2. SP RK 3.02-113-2014 (s izmenenijami i dopolnenijami po sostojaniju na 29.05.2025 g.) Lechebno-profilakticheskie uchrezhdenija. Dostup iz informacionnoj sistemy «Paragraf». - https://prg.kz/Document/?doc_id=39540499 (data obrashhenija 10.12.2025) - jelektronnyj resurs
3. SN RK 3.02-13-2014 Lechebno-profilakticheskie uchrezhdenija (s izmenenijami i dopolnenijami po sostojaniju na 12.04.2023 g.). Dostup iz informacionnoj sistemy «Paragraf». - https://prg.kz/Document/?doc_id=39513712 (data obrashhenija 10.12.2025) - jelektronnyj resurs
4. Mezhdunarodnaja ob#edinennaja komissija. Standarty akkreditacii dlja bol'nic: vkljuchaja standarty dlja bol'nic akademicheskogo medicinskogo centra // Mezhdunarodnaja ob#edinennaja komissija (JCI). - 8-e izd. - Okbruk-Terras: Joint Commission Resources, 2024. - 524 s. - ISBN 978-1-63585-347-6 - kniga
5. Facility Guidelines Institute. Guidelines for Design and Construction of Hospitals. - St. Louis: Facility Guidelines Institute, 2022. 552 p. - книга
6. Joseph, A. L. Patient journey mapping: Current practices, challenges and future opportunities in healthcare // A. L. Joseph, A. W. Kushniruk, E. M. Borycki. Text:

electronic// Knowledge Management & E-Learning. 2020. Vol. 12, no. 4. P. 387-404. - DOI: https://doi.org/10.34105/j.kmel.2020.12.021 - журнал
7. To Err Is Human: Building a Safer Health System // National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. - Washington, DC: The National Academies Press, 2000. - URL: https://doi.org/10.17226/60 (дата обращения 09.01.2026) - электронный ресурс
8. Reason, J. Human Error // J. Reason. - Cambridge: Cambridge University Press, 1990. - 302 p. - книга
9. Reiling, J. Safe design of healthcare facilities // J. Reiling. - Text : unmediated // Quality and Safety in Health Care. - 2006. - Vol. 15, Suppl. 1. - P. 134 - 140. - DOI: https://doi.org/10.1136/qshc.2006.019422 - журнал
10. SNiP II-69-78. Lechebno-profilakticheskie uchrezhdenija: stroit. normy i pravila: utv. Gosstroem SSSR 17.05.78: vzamen glavy SNiP II-L.9-70. - M.: Strojizdat, 1978. - Zakonodatel'nye i normativnye dokumenty
11. Posobie po proektirovaniju uchrezhdenij zdravoohranenija (k SNiP 2.08.02-89). Razdel I. Obshhie polozhenija. Inzhenernoe oborudovanie // GiproNIIzdrav Minzdrava SSSR. - M.: GiproNIIzdrav, 1990. - Zakonodatel'nye i normativnye dokumenty
12. Hamilton D. K. Design for Critical Care: An Evidence-Based Approach // D. K. Hamilton, M. M. Shepley. - Oxford: Architectural Press, 2010. - 312 p. - zhurnal
13. Burlingame, B. L. Operating Room Requirements for 2014 and Beyond // B. L. Burlingame // 2014 FGI Guidelines Update Series. - 2014. - Update #3. - URL: https://fgiguidelines.org (data obrashhenija 13.01.2026).
14. NDCS RK 8.01-13-2024 «Metodicheskie rekomendacii po razrabotke normativov predel'noj stoimosti stroitel'stva»// Dostup iz informacionnoj sistemy «Paragraf» - https://prg.kz/Document/?doc_id=36238889 (data obrashhenija 21.12.2025) - jelektronnyj resurs
15. Fuller S. K. Life-Cycle Cost Analysis (LCCA)// Whole Building Design Guide. - Washington, DC: National Institute of Building Sciences, 2016. - URL: https://www.wbdg.org/resources/life-cycle-cost-analysis-lcca (data obrashhenija 09.02.2026)
16. SO 15686-5:2017. Buildings and constructed assets// Service life planning - Part 5: Life-cycle costing. - Geneva: International Organization for Standardization, 2017. - 46 p - kniga
17. Ulrich R. S. A Review of the Research Literature on Evidence-Based Healthcare Design // R. S. Ulrich, C. Zimring, X. Zhu [et al.] // Health Environments Research & Design Journal (HERD). - 2008. - Vol. 1, no. 3. - P. 61-125. - DOI: https://doi.org/10.1177/193758670800100306

Information about the authors:

Yugay M. S. – corresponding author, 1st-year Master's student, Faculty of Architecture and Civil Engineering, L. N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan Street, 010000, Astana, Kazakhstan. Architect at *AstanaInzhProekt* LLP

Semenyuk O.N**.** – Candidate of Architecture, Acting Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Construction, L. N. Gumilyov Eurasian National University (NAO), 13 Kazhymukan Street, 010000, Astana, Kazakhstan

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Научная статья https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-97-119

Принципы архитектурно-планировочной организации учреждений среднего профессионального образования Казахстана

Д.Б. Баймулдина , С.Ш.Садыкова

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

E mail: Baymuldina_d@mail.ru, Sadykova_ssh@enu.kz

Аннотация. В статье рассматриваются принципы архитектурно-планировочной организации учреждений среднего профессионального образования Казахстана в контексте модернизации системы технического и профессионального образования и усиления связи обучения с производственной практикой. Актуальность исследования определяется необходимостью перехода от традиционной модели колледжа как учебного здания к модели образовательно-производственного комплекса, объединяющего теоретическое обучение, практическую подготовку, общественные пространства и взаимодействие с индустриальными партнерами. Методологической основой работы является сравнительный архитектурно-планировочный анализ колледжей Казахстана, включая APEC Petro Technic в Атырау и Колледж сервиса и туризма в Астане, а также профессиональных образовательных комплексов Китая — экспериментально-учебного здания Zibo Education и Профессионально-технического колледжа залива Мэйчжоу. Анализ позволил сопоставить функциональное зонирование, взаимосвязь учебных и практических помещений, общественные пространства и характер кампусной организации. В результате исследования выявлены ключевые принципы: интеграция учебных и производственных зон, формирование общественно-коммуникационного ядра, функциональное кластерирование, обеспечение коротких связей между теорией и практикой, гибкость планировочной структуры и открытость колледжа к городской и производственной среде. Сформулированы основные принципы развития колледжей Казахстана как современных образовательно-производственных платформ.

Ключевые слова: среднее профессиональное образование; архитектура колледжей; Казахстан; Китай; архитектурно-планировочная организация.

Received 25.12.2025. Revised 15.09.2026. Accepted 18.09.2026. Available online 30.09.2026.

* the correspondence author

Введение

Современное развитие системы среднего профессионального образования Казахстана связано с необходимостью подготовки квалифицированных кадров для промышленности, строительства, транспорта, сервиса, нефтегазовой отрасли, сельского хозяйства и новых технологических направлений. В условиях обновления экономики и усиления практико-ориентированного обучения колледж уже не может рассматриваться только как традиционное учебное здание с набором аудиторий, административных помещений и мастерских. Его архитектурно-планировочная организация должна обеспечивать связь теоретического обучения, производственной практики, профессиональной социализации студентов и взаимодействия с предприятиями.

Актуальность исследования определяется тем, что сеть организаций технического и профессионального образования Казахстана остается значительной по масштабу и социальной роли. На начало 2025-2026 учебного года в Республике Казахстан функционировало более 700 самостоятельных организаций технического и профессионального образования, а общая численность обучающихся составила свыше 560 тыс. человек [1]. При этом рост приема студентов и развитие государственного образовательного заказа усиливают требования не только к содержанию образовательных программ, но и к качеству архитектурной среды колледжей. Современные здания должны быть способны принимать новые технологии, обеспечивать практическую подготовку, создавать гибкие лабораторные и производственные пространства, а также формировать привлекательную образовательную среду [2,3].

В современных исследованиях образовательной среды подчеркивается, что пространственная организация учебных зданий влияет на комфорт, вовлеченность и результаты обучения, а гибкость среды становится одним из условий адаптации образования к новым форматам деятельности [4-6]. Для учреждений среднего профессионального образования это особенно важно, поскольку их планировочная структура должна одновременно поддерживать теоретическое обучение, практическую подготовку, демонстрацию оборудования, проектную работу и коммуникацию с работодателями.

Исторически архитектура учреждений среднего профессионального образования Казахстана формировалась на основе советской модели профессионально-технических училищ и техникумов. Для этой модели были характерны типовые проектные решения, функциональное разделение учебных и производственных помещений, а также ориентация на подготовку кадров для конкретных отраслей экономики [7-10]. Однако в современных условиях прежняя планировочная структура не всегда отвечает требованиям дуального обучения, обновления материально-технической базы и необходимости интеграции колледжа с реальной производственной средой. Поэтому актуальной становится задача выявления таких архитектурно-планировочных принципов, которые позволят перейти от модели изолированного учебного здания к модели образовательно-производственного комплекса.

В отечественной архитектурной науке вопросы формирования и трансформации общественных и образовательных зданий рассматриваются в работах казахстанских исследователей. С. Ш. Садыкова исследует современные подходы к формированию архитектуры образовательных учреждений Казахстана, обращая внимание на взаимосвязь архитектурной среды, образовательного процесса и требований к качеству внутренних учебных пространств [11]. Для настоящего исследования важным является положение о

необходимости формирования образовательной среды как целостной системы, в которой архитектурно-пространственные решения должны соответствовать изменяющимся требованиям обучения.

Значимыми для определения принципов дальнейшего развития колледжей являются исследования Е. К. Дуйсебая, посвященные архитектуре общественных зданий и сооружений, гибко адаптируемой к динамике социальных изменений [12]. Автор рассматривает функционально-планировочную структуру общественного здания как изменяемую систему и обосновывает применение гибких планировочных решений, вариабельной архитектурной структуры и пространственно-конструктивных модулей. Данный подход приобретает особую актуальность для учреждений среднего профессионального образования Казахстана, поскольку изменение образовательных программ, появление нового технологического оборудования и развитие практико-ориентированного обучения требуют возможности трансформации и поэтапного расширения учебных, лабораторных и производственных пространств.

Особое значение в этом контексте имеет сравнительный анализ зарубежного опыта, прежде всего китайских профессиональных колледжей. Китайские примеры демонстрируют более целостный подход к формированию профессионального образовательного кампуса, где учебные корпуса, лаборатории, мастерские, общественные пространства, жилые блоки, спортивные зоны и производственно-практические помещения объединяются в единую планировочную систему. В таких комплексах практическая подготовка не является второстепенной функцией, а становится частью общей пространственной структуры. Это позволяет рассматривать кампус как среду «обучения через действие», где теория, практика и профессиональная коммуникация связаны между собой пространственно и функционально [13,14].

Китайские профессиональные кампусы рассматриваются не как объект прямого копирования, а как сравнительная модель для выявления архитектурно-планировочных приемов, применимых к условиям Казахстана. Для анализа используются примеры, в которых выражены разные типы планировочной организации: интеграция учебных и экспериментально-производственных помещений через общий двор, формирование общественного ядра, кластерное размещение учебных и практических блоков, связь кампуса с жилой и городской средой, а также включение производственных зон в структуру учебного процесса [15,16].

Казахстанские примеры, в свою очередь, позволяют выявить реальные особенности отечественной практики. В частности, APEC Petro Technic в Атырау представляет собой отраслевой колледж, связанный с нефтегазовым сектором и производственной специализацией региона [17]. Колледж сервиса и туризма в Астане демонстрирует более компактную городскую модель, где учебные аудитории, мастерские, лаборатории и общественные зоны размещаются в пределах ограниченного участка или одного здания [18]. Сопоставление этих объектов с китайскими профессиональными кампусами позволяет определить, какие планировочные решения уже формируются в Казахстане, а какие требуют дальнейшего развития.

Таким образом, проблема исследования заключается в недостаточной разработанности архитектурно-планировочных принципов организации современных колледжей Казахстана с учетом интеграции обучения и производства. Если ранее основное внимание уделялось истории, вместимости, географии и типологии учреждений среднего

профессионального образования, то в современных условиях на первый план выходит анализ их планировочной структуры: взаимосвязи учебных аудиторий, лабораторий, мастерских, общественных пространств, общежитий, дворов, транспортных подходов и производственных зон.

Цель статьи - выявить архитектурно-планировочные принципы организации учреждений среднего профессионального образования Казахстана на основе сравнительного анализа планировочных моделей отечественных колледжей и китайских профессиональных колледжей.

Для достижения цели поставлены следующие задачи: рассмотреть современное состояние и предпосылки развития архитектуры колледжей Казахстана; проанализировать планировочные особенности выбранных казахстанских и китайских примеров; определить характер взаимосвязи учебных, практических, общественных и производственных зон; выявить архитектурно-планировочные приемы, которые могут быть адаптированы для проектирования и модернизации колледжей Казахстана.

Объектом исследования являются учреждения среднего профессионального образования Казахстана. Предметом исследования выступают архитектурно-планировочные принципы их организации, включая функциональное зонирование, связь учебных и производственных пространств, формирование общественного ядра, «кампусную» структуру, гибкость планировки и взаимодействие с городской и производственной средой.

Научная значимость исследования состоит в переходе от описательной характеристики колледжей к выявлению системы проектных принципов. Практическая значимость заключается в возможности использования результатов исследования при разработке новых проектов колледжей, реконструкции существующих зданий и формировании рекомендаций по развитию учебно-производственной инфраструктуры среднего профессионального образования Казахстана.

Методология

Методологической основой исследования является сравнительный архитектурно-планировочный анализ учреждений среднего профессионального образования Казахстана и профессиональных образовательных комплексов Китая. Данный подход позволяет рассматривать колледж не только как отдельное учебное здание, но как пространственную систему, в которой взаимосвязаны учебные аудитории, лаборатории, производственно-практические помещения, общественные зоны, дворы, общежития, спортивная инфраструктура и связи с городской или производственной средой.

В отличие от описательной классификации учреждений среднего профессионального образования по вместимости или территориальному размещению, основное внимание уделяется планировочной структуре объектов. Анализ направлен на выявление того, каким образом в архитектуре колледжа организуется связь теоретического обучения и практической подготовки, где размещаются учебно-производственные мастерские, как формируется общественное ядро, каким образом обеспечивается движение студентов между функциональными зонами, и насколько планировочная структура поддерживает современные формы профессионального обучения.

Материалами исследования послужили схемы генеральных планов, планы первых этажей, визуальные материалы, экспликации помещений и аналитические схемы выбранных колледжей Казахстана и Китая. В качестве отечественных примеров

рассмотрены APEC Petro Technic в г. Атырау и колледж сервиса и туризма в г. Астана. Эти объекты позволяют выявить особенности отечественной практики: связь колледжа с отраслевой специализацией региона, размещение учебных и практических помещений, организацию общественных зон и характер взаимодействия здания с городской средой [17,18].

В качестве зарубежных аналогов рассмотрены китайские профессиональные образовательные комплексы: экспериментальное и учебное здание Zibo Education, связанное с интеграционной базой науки и промышленности, а также Профессионально-технический колледж залива Майчжоу. Эти примеры выбраны потому, что в них более последовательно выражена идея интеграции образовательной, практической, общественной и «кампусной» среды. В китайских объектах учебные корпуса, лаборатории, мастерские, общественные пространства и жилые зоны рассматриваются как элементы единой планировочной системы, что представляет интерес для разработки принципов организации колледжей Казахстана [15,16].

Сравнительный анализ проводился по следующим критериям:

1. размещение объекта в городской или производственной структуре;
2. характер генерального плана и композиции территории;
3. взаимосвязь учебных аудиторий, лабораторий и мастерских;
4. наличие и роль общественно-коммуникационного ядра;
5. организация движения студентов между учебными и практическими зонами;
6. степень интеграции производственной практики в структуру здания или кампуса;
7. возможность гибкого использования и дальнейшего развития планировочной структуры.

Такой метод позволяет перейти от описания отдельных объектов к выявлению общих архитектурно-планировочных принципов. В результате исследования китайские примеры рассматриваются не как образцы для прямого заимствования, а как сравнительная база, позволяющая определить направления развития казахстанских колледжей: усиление связи учебных и производственных зон, формирование общественного ядра, развитие кампусной логики, создание гибких лабораторно-практических пространств и более активное включение колледжа в городскую и производственную среду. Основные характеристики рассматриваемых объектов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Объекты сравнительного архитектурно-планировочного анализа

№	Объект анализа	Страна/ город	Тип объекта	Основной планировочный интерес для исследования
1	APEC Petro Technic	Казахстан, Атырау	Отраслевой колледж нефтегазового профиля	Связь колледжа с производственной специализацией региона; сочетание учебных корпусов, общежитий, спортивной зоны и учебно-производственных мастерских в едином комплексе.

2	Колледж сервиса и туризма	Казахстан, Астана	Городской колледж сервисного профиля	Компактная планировочная модель в условиях городской застройки; размещение учебных аудиторий, практических помещений, общественных зон и дворового пространства в пределах ограниченного участка.
3	Экспериментальное и учебное здание Zibo Education	Китай, Циндао	Учебно-экспериментальный корпус, связанный с научно-производственной базой	Интеграция учебных, лабораторных и экспериментально-производственных помещений через общий двор; преобладание практических зон над традиционными аудиториями.
4	Профессионально-технический колледж залива Майчжоу	Китай	Профессиональный образовательный кампус	Кампусная структура с учебными, практическими, жилыми, спортивными и общественными зонами; функциональная связь теории, практики и профессиональной среды.

Результаты и обсуждение

Анализ колледжей Казахстана показывает, что современная архитектура учреждений среднего профессионального образования постепенно переходит от традиционной модели учебного корпуса к более сложной структуре, включающей учебные, практические, общественные и вспомогательные зоны. Однако в большинстве случаев связь между теоретическим обучением и производственной практикой еще не всегда выражена как единая архитектурно-планировочная система. Практические помещения, мастерские и лаборатории часто размещаются рядом с учебными аудиториями, но не всегда становятся композиционным и функциональным центром здания.

Одним из наиболее показательных отечественных примеров является APEC Petro Technic в городе Атырау. Данный объект представляет собой отраслевой колледж, ориентированный на подготовку кадров для нефтегазового сектора Западного Казахстана. Его градостроительное положение связано не только с городской структурой Атырау, но и с производственной специализацией региона. В этом проявляется важный принцип размещения учреждений среднего профессионального образования: колледж должен быть связан с экономическим профилем территории и базовыми предприятиями, для которых осуществляется подготовка специалистов [17] (рисунок 1).

Планировочная организация APEC Petro Technic демонстрирует комплексный подход к

формированию образовательной среды. На территории размещены учебные корпуса, общежития, спортивные объекты, столовая, административные помещения и учебно-производственные мастерские.



Рисунок 1. Анализ взаимосвязи колледжа APEC Petro Technic, г. Атырау с местным производством

Важной особенностью является наличие практических блоков, в которых моделируются реальные производственные процессы. Это позволяет приблизить обучение к условиям будущей профессиональной деятельности и усилить практическую направленность образовательного процесса (рисунок 2).

При этом структура комплекса сохраняет достаточно четкое функциональное разделение. Учебные корпуса и общежития образуют одну часть территории, а учебно-производственные мастерские выделяются как специализированная зона. Такая организация удобна с точки зрения безопасности, эксплуатации и контроля производственных процессов. Однако с позиции современной архитектуры колледжа важно, чтобы практические помещения не воспринимались как второстепенное дополнение, а были включены в общую образовательную логику движения студентов.

Другой тип отечественной планировочной модели представлен Колледжем сервиса и туризма в городе Астана. В отличие от APEC Petro Technic, данный объект расположен в городской среде и имеет более компактную структуру. Его архитектурная организация основана на размещении учебных, общественных и практических помещений в пределах

одного здания и ограниченного участка. Такая модель характерна для многих городских колледжей Казахстана, где территория не позволяет формировать развернутый кампус, а основные функции должны быть объединены внутри здания [18].



Рисунок 2. Анализ функциональной связи учебных и практических помещений в архитектурно-планировочной организации APEC Petro Technic, г. Атырау

План первого этажа Колледжа сервиса и туризма показывает, что учебные аудитории, практические кабинеты, библиотека, столовая, выставочная зона, вестибюль и рекреационные пространства объединены в компактной структуре. Центральное значение получает общественная зона, через которую организуются основные потоки студентов. Это позволяет формировать внутреннее коммуникационное ядро, связывающее учебные и практические помещения (рисунок 3).



Рисунок 3. Анализ функциональной связи учебных и практических помещений в планировочной структуре Колледжа сервиса и туризма, г. Астана

Сравнение двух примеров показывает, что отечественная практика имеет два важных направления развития. Первое связано с отраслевыми колледжами, где архитектура ориентирована на производственную специализацию региона и требует развитой учебно-производственной инфраструктуры.

Второе связано с городскими колледжами компактного типа, где главной задачей

становится рациональное объединение учебных, практических и общественных пространств в пределах одного здания. В обоих случаях ключевым вопросом является не только наличие мастерских и лабораторий, но и качество их пространственной связи с учебными аудиториями, общественным ядром и внешней средой.

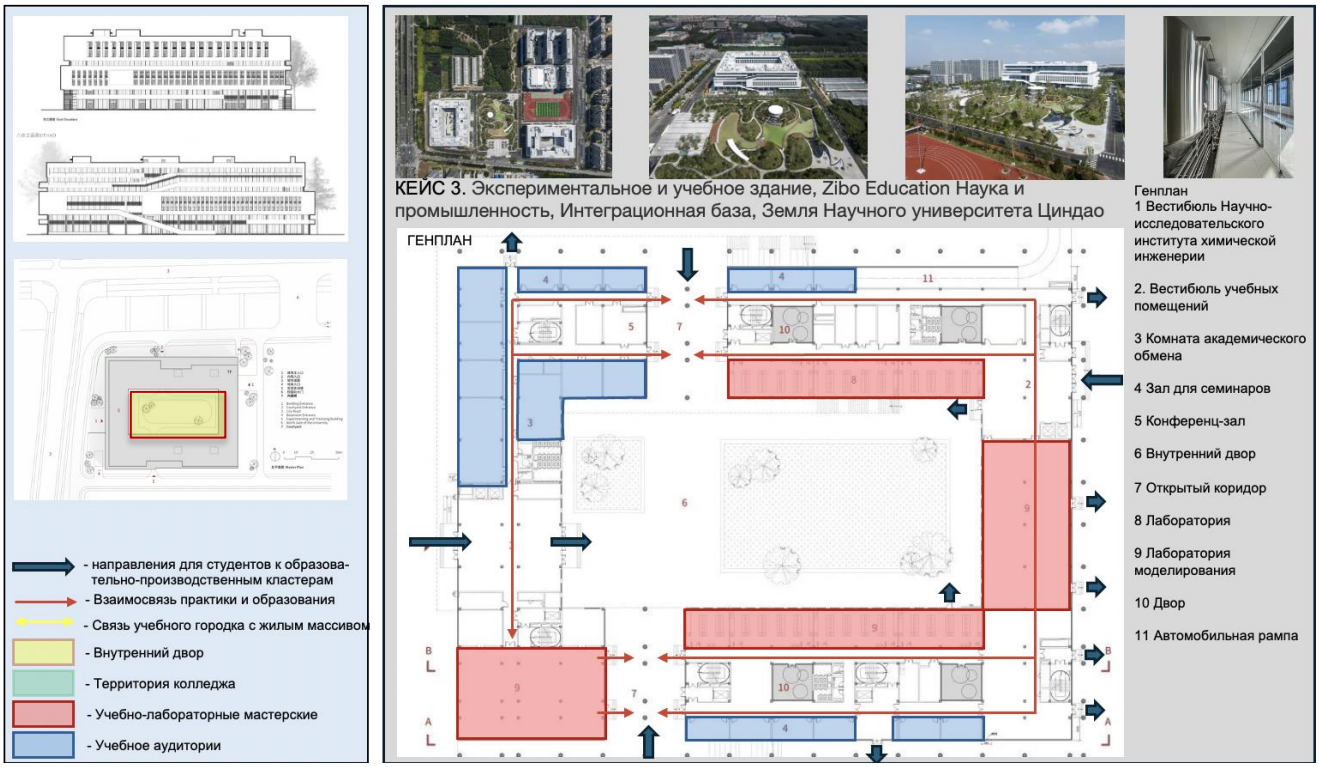


Рисунок 4. Анализ связи учебных и экспериментально-производственных помещений в структуре Zibo Education, Китай

Планировочные особенности китайских профессиональных образовательных комплексов

Китайские профессиональные образовательные комплексы представляют интерес для данного исследования, поскольку в них более последовательно выражена связь учебной, практической, общественной и кампусной функций. В отличие от многих традиционных колледжей, где производственные мастерские или лаборатории размещаются как вспомогательные помещения, в китайских примерах практическая подготовка становится важной частью общей архитектурно-планировочной структуры. Это проявляется в организации генерального плана, во взаимосвязи корпусов, в использовании внутренних дворов, общественных осей и функциональных кластеров [15-16].

Первым примером является экспериментальное и учебное здание Zibo Education, связанное с интеграционной базой науки и промышленности в Циндао. Данный объект демонстрирует модель, в которой учебные, лабораторные и экспериментально-производственные помещения объединяются через общий внутренний двор и систему горизонтальных связей. Планировочная структура здания строится не только вокруг учебных аудиторий, но и вокруг лабораторий, помещений моделирования, открытых коридоров, залов для семинаров, конференц-зала и внутреннего двора. Такое решение

позволяет сформировать среду, где практическая и исследовательская деятельность становится частью повседневного образовательного процесса [16]. (рисунок 4).

На плане данного объекта заметно, что учебные аудитории и лабораторные помещения не изолированы друг от друга, а расположены в непосредственной взаимосвязи. Красным цветом выделены лабораторные и практические зоны, синим - учебные аудитории. Между ними организованы короткие маршруты движения, что обеспечивает быстрый переход от теоретического занятия к практической работе. Внутренний двор выполняет не только рекреационную функцию, но и роль пространственного ядра, вокруг которого группируются основные образовательные и практические помещения.

Особое значение имеет то, что практические помещения занимают значительную часть планировочной структуры и не являются второстепенным дополнением к учебным аудиториям. Они формируют самостоятельный функциональный слой здания. Это соответствует современной модели профессионального образования, где подготовка специалиста строится не только на передаче теоретических знаний, но и на постоянном включении студента в процесс эксперимента, моделирования, наблюдения и практического действия.

Вторым примером является Профессионально-технический колледж залива Майчжоу, спроектированный как крупный образовательный кампус. Его планировочная организация основана на разделении и одновременной взаимосвязи учебных, практических, жилых, спортивных, общественных и административных зон. На генеральном плане выделяются главные школьные ворота, центральное озеро, студенческая улица, административное здание, государственный учебный корпус, учебно-практическое здание факультета, учебное здание, информационный центр-библиотека, лектории, гимназия, спортивный стадион, общежития для студентов и другие элементы кампусной инфраструктуры (рисунок 5) [15].

В отличие от компактных городских колледжей, данный объект формирует полноценную кампусную среду, где образовательный процесс выходит за пределы отдельного здания. Учебные и практические корпуса размещаются в системе пешеходных связей, общественных пространств и ландшафтных зон. Студенческая улица и центральные общественные пространства выполняют роль коммуникационного каркаса, который объединяет разные функциональные зоны кампуса. Благодаря этому обучение, проживание, отдых, спорт и профессиональная подготовка становятся частями единой образовательной среды.

В планировке колледжа залива Майчжоу особенно важна интеграция учебно-практических блоков в общую структуру генерального плана. Практические здания не выносятся на периферию как обслуживающие объекты, а включаются в систему основных студенческих маршрутов. Это создает условия для постоянной видимости и доступности практического обучения. Студент воспринимает мастерские, лаборатории и учебно-практические корпуса не как отдельную производственную зону, а как равноправную часть кампуса.

«Кампусная» модель данного объекта также демонстрирует важность общественных и ландшафтных пространств. Центральное озеро, студенческая улица, открытые площади, спортивные зоны и общественные здания формируют среду, в которой профессиональное образование получает более высокий социальный статус. Колледж становится не только местом получения специальности, но и пространством студенческой жизни, коммуникации, проектной деятельности и профессиональной идентификации.

Сравнение двух примеров колледжей Китая показывает, что в современной профессиональной образовательной архитектуре страны используются два взаимодополняющих подхода. Первый подход связан с интеграцией учебных, лабораторных и экспериментальных помещений в структуре одного здания через внутренний двор и короткие горизонтальные связи. Второй подход связан с формированием крупного кампуса, где учебные, практические, жилые, общественные и спортивные функции объединены системой генерального плана. В обоих случаях главным является не только наличие практических помещений, но и их активная пространственная связь с образовательной средой.

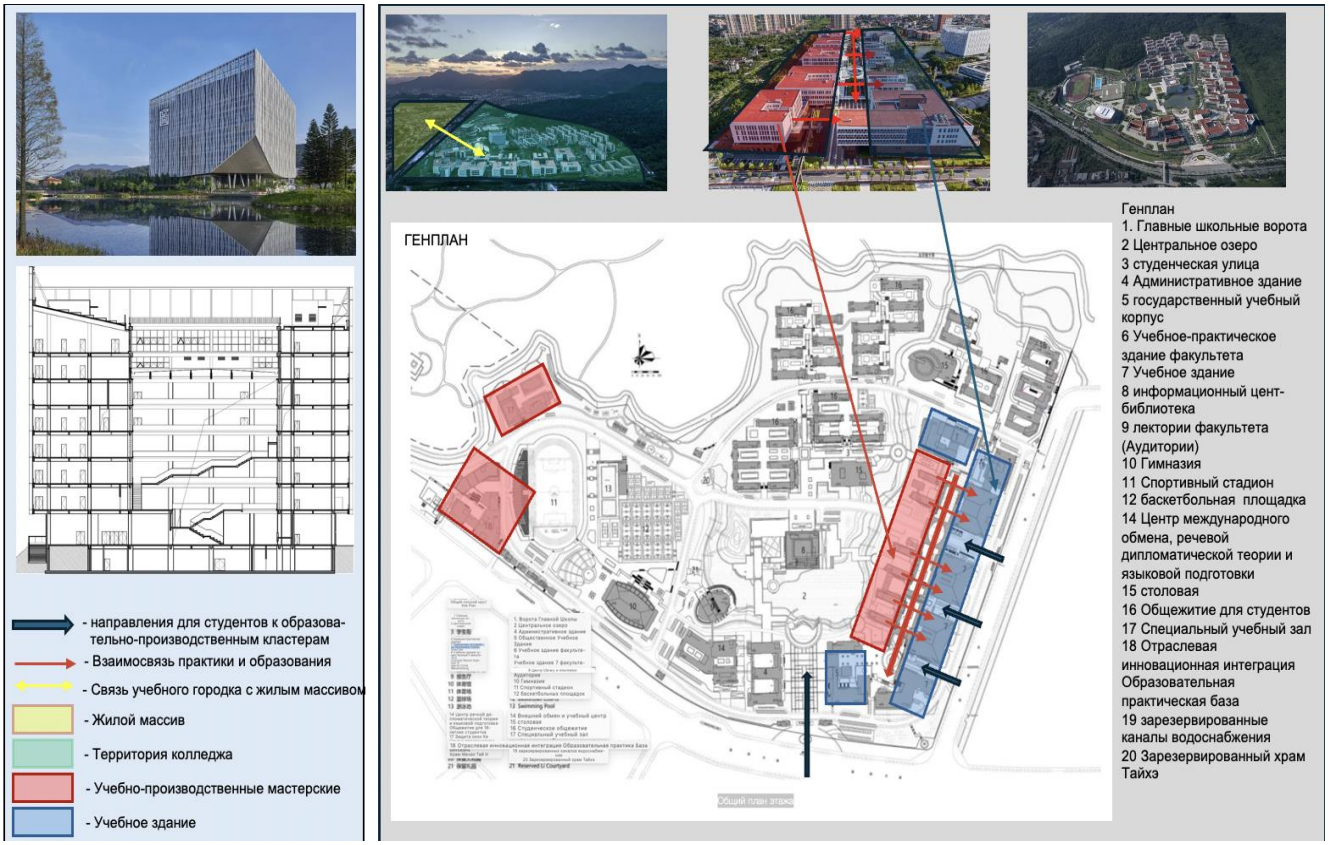


Рисунок 5. Анализ функционального зонирования и взаимосвязи практики и обучения в Профессионально-техническом колледже залива Майчжоу, Китай. («Кампусная модель»).

Для Казахстана данные примеры важны как источник архитектурно-планировочных принципов, которые могут быть адаптированы к местным условиям. Наиболее значимыми являются: включение практических блоков в основную структуру здания или кампуса; формирование внутреннего двора или общественного ядра как связующего элемента; создание коротких маршрутов между теоретическими и практическими помещениями; организация функциональных кластеров по направлениям подготовки; использование территории колледжа как активной образовательной среды; повышение роли общественных пространств в формировании профессиональной идентичности студентов.

Сопоставление колледжей Казахстана и Китая позволяет выявить различия не столько в масштабе, сколько в способе организации связей между учебными, практическими, общественными и производственными зонами. Сопоставление рассмотренных планировочных решений позволило не только определить различия между казахстанскими и зарубежными объектами, но и выделить конкретные архитектурные приемы, представляющие интерес для дальнейшего развития колледжей Казахстана.

Архитектурный анализ рассмотренных зарубежных объектов позволил выявить ряд планировочных приемов, представляющих интерес для дальнейшего развития учреждений среднего профессионального образования Казахстана. Одним из наиболее значимых является логистика организации связей производственных, учебных и лабораторных секторов. В исследуемых объектах прослеживаются пути краткого сообщения между ними, благодаря которым обеспечивается непосредственный и последовательный переход от теоретического обучения к лабораторной работе и производственной практике. Существенным является не только наличие этих функциональных секторов, но прежде всего характер их взаимного расположения и степень пространственной связанности.

На этой основе формируются принципы, применимые для дальнейшего проектирования и модернизации колледжей Казахстана. Результаты сравнительного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ планировочных решений Казахстана и Китая

Критерий анализа	**Казахстанские колледжи**	**Китайские профессиональные комплексы**	**Вывод для Казахстана**
Градостроительное размещение	Связь с городом и отраслевой специализацией региона выражена выборочно. APEC Petro Technic связан с нефтегазовым профилем Атырау, а Колледж сервиса и туризма встроен в городскую ткань Астаны.	Кампусы чаще рассматриваются как часть городской, жилой и производственной структуры. Образовательная территория связана с внешними потоками, общественными пространствами и кампусной инфраструктурой.	При выборе участка необходимо учитывать не только транспортную доступность, но и связь с производственным профилем региона, предприятиями-партнерами и жилой средой.
Генеральный план	В примерах колледжей Казахстана наблюдается либо компактная городская структура, либо отраслевой	Китайские примеры формируют более развитую систему корпусов, дворов, общественных осей, студенческих улиц,	Необходимо развивать колледж как систему взаимосвязанных пространств, а не только как

	комплекс с разделением учебных, жилых, спортивных и практических зон.	спортивных и жилых зон.	отдельное учебное здание.
Связь теории и практики	Практические помещения присутствуют, но часто остаются функционально выделенными и не всегда становятся композиционным центром здания.	Практические, лабораторные и экспериментальные блоки активно включены в основные маршруты движения и структуру здания или кампуса.	Учебно-производственные зоны должны становиться равноправной частью образовательной среды и располагаться в короткой связи с аудиториями.
Общественное ядро	В городских колледжах общественная зона чаще формируется через вестибюль, холл, библиотеку, столовую или выставочное пространство.	Общественное ядро часто формируется через внутренний двор, студенческую улицу, центральные площади, библиотеку, информационный центр и ландшафтные зоны.	Колледжам Казахстана необходимо формировать общественно-коммуникационное ядро как пространство общения, проектной работы и профессиональной социализации.
Функциональное зонирование	Преобладает разделение на учебный блок, практический блок, административные и вспомогательные помещения.	Используется кластерный принцип: учебные, лабораторные, практические, общественные и жилые зоны связаны общей планировочной логикой.	Следует переходить от простого функционального разделения к кластерной организации по направлениям подготовки и видам деятельности.
Движение студентов	Маршруты чаще строятся от входа к учебным аудиториям и	Движение организовано через дворы, галереи, студенческие улицы	Планировка должна обеспечивать понятную траекторию: вход -

	практическим помещениям, но не всегда образуют единую образовательную траекторию.	и общественные оси, связывающие теорию, практику, проживание и отдых.	общественное ядро - аудитории - лаборатории - мастерские - двор или практическая зона.
Гибкость и развитие	Возможности трансформации ограничены существующей структурой зданий и участков, особенно в городских колледжах.	Кампусная и кластерная структура легче допускает расширение, изменение функций и развитие новых учебно-практических блоков.	При проектировании новых колледжей и реконструкции существующих необходимо предусматривать модульность, резерв площадей и возможность поэтапного расширения.
Архитектурный принцип	Формируется переход от традиционного учебного здания к учебно-практическому комплексу.	Развивается модель целостной образовательно-производственной и кампусной среды.	Перспективная модель для Казахстана - колледж как образовательно-производственная платформа с общественным ядром, практическими кластерами и связью с регионом.

Второй особенностью является пространственная незамкнутость планировочной структуры. Внутреннее пространство здания не изолируется от внешней среды, а имеет открытые пути доступа как из здания во двор, так и из общего двора обратно в разные функциональные части комплекса. Общий двор при этом выступает не только как рекреационное пространство, но и как элемент планировочной структуры, связывающий между собой учебные, лабораторные, общественные и практические зоны. За счет этого формируется более открытая образовательная среда, в которой внутренние и наружные пространства работают во взаимосвязи.

Третьей особенностью является наличие научно-исследовательского компонента непосредственно в структуре образовательного комплекса. Включение научно-исследовательских и экспериментальных помещений расширяет традиционную функцию профессионального образовательного учреждения. Учебный процесс получает непосредственную связь не только с производственной практикой, но и с исследовательской и инновационной деятельностью. Для развития колледжей Казахстана данный прием представляет особый интерес в связи с возможностью формирования при

них специализированных лабораторий, экспериментальных центров и исследовательских подразделений, связанных с направлениями подготовки и предприятиями-партнерами.

Следующим важным качеством рассмотренных объектов является воздушное открытое пространство и продуманная прогулочная инфраструктура территории. Пешеходные маршруты, дворы, открытые общественные пространства, озеленение и места отдыха образуют единую систему и становятся полноценной частью образовательной среды. Территория воспринимается не как свободное пространство между отдельными корпусами, а как продолжение архитектуры образовательного комплекса, обеспечивающее движение, общение, отдых и повседневное взаимодействие студентов.

Особое значение имеет непосредственная связь главных функциональных секторов - учебной и производственной зон. В рассматриваемых зарубежных примерах производственные и практические помещения не являются обособленным или второстепенным дополнением к учебному зданию. Они непосредственно включены в общую архитектурно-планировочную структуру и связаны с учебными помещениями краткими маршрутами. Именно такое пространственное сближение учебной и производственной функций создает условия для непрерывного взаимодействия теоретического обучения и практической подготовки.

Еще одной особенностью является кампусный характер организации профессиональных образовательных комплексов. Многие из рассмотренных объектов формируются как относительно самостоятельные образовательные городки, расположенные обособленно от плотной городской застройки и имеющие собственную внутреннюю среду. В пределах такой территории размещаются не только учебные, лабораторные и производственные корпуса, но и жилье для студентов, спортивные сектора, общественные пространства, объекты питания, рекреационные территории и инфраструктура досуга. Таким образом, внутри кампуса продумывается практически весь цикл повседневной жизни студента - обучение, практическая деятельность, проживание, спорт, отдых и коммуникация.

Выявленные особенности рассматриваются в настоящем исследовании не как элементы прямого заимствования зарубежного опыта, а как архитектурно-планировочные приемы, которые могут быть адаптированы к условиям Казахстана. Наибольший интерес представляет формирование кратких связей между учебными, лабораторными и производственными секторами, открытость планировочной структуры и ее связь с дворовыми пространствами, включение исследовательской функции, развитие полноценной прогулочной и общественной инфраструктуры, непосредственная связь обучения с производством, а также возможность формирования самостоятельной кампусной среды при проектировании новых профессиональных образовательных комплексов.

На основе сравнительного анализа казахстанских колледжей и китайских профессиональных образовательных комплексов можно выделить ряд архитектурно-планировочных принципов, которые определяют пространственную организацию современного учреждения среднего профессионального образования. В данном разделе принципы рассматриваются не как общие выводы, а как конкретные проектные приемы, связанные с размещением функциональных зон, организацией движения студентов,

взаимосвязью учебных и практических помещений, формированием общественных пространств и возможностью дальнейшей модернизации здания.

В предлагаемом подходе к развитию архитектурно-планировочной структуры колледжей Казахстана выявленные приемы конкретизируются следующим образом: учебные, лабораторные и производственные секторы объединяются системой кратких функциональных связей; учебная и производственная зоны рассматриваются как взаимосвязанные основные элементы образовательной структуры; внутренний двор включается в систему коммуникаций между функциональными блоками; предусматривается возможность включения научно-исследовательских и экспериментальных помещений; территория колледжа формируется как полноценная пешеходная, общественная и рекреационная среда. При новом строительстве данные решения могут развиваться в формате самостоятельного кампуса, включающего наряду с учебными и производственными функциями общежития, спортивные и общественные объекты и инфраструктуру повседневной жизни студентов. Таким образом, зарубежный опыт применяется не путем прямого копирования объемно-планировочных решений, а посредством адаптации принципов пространственной взаимосвязи, открытости, функциональной интеграции и комплексного развития территории к условиям Казахстана.

1. Принцип интеграции учебных и практических зон

Планировочная структура современного колледжа должна строиться на непосредственной связи теоретических и практических помещений. Учебные аудитории, лаборатории, мастерские, демонстрационные классы и специализированные кабинеты целесообразно размещать не изолированно, а в пределах единой функциональной группы.

В китайских примерах данный прием проявляется через размещение лабораторий и экспериментальных помещений рядом с учебными аудиториями, вокруг общего двора или вдоль единой коммуникационной оси. Такая структура сокращает путь студента от теории к практике и делает практическую подготовку частью повседневного образовательного процесса [15-16].

Для колледжей Казахстана этот принцип особенно важен при проектировании новых учебно-производственных блоков и реконструкции существующих мастерских. Практические помещения должны располагаться не как второстепенная хозяйственная зона, а как видимая и доступная часть образовательной среды.

2. Принцип функционального кластерирования

Функциональное деление по кластерам предполагает группировку помещений по направлениям подготовки. Внутри одного кластера могут объединяться учебная аудитория, лаборатория, мастерская, помещение хранения оборудования, зона демонстрации и небольшое пространство для групповой работы.

Такой прием позволяет избежать хаотичного распределения кабинетов по зданию и делает структуру колледжа более понятной. Например, для сервисного направления кластер может включать учебные кухни, гостиничные номера, кабинеты обслуживания и демонстрационные зоны. Для технического направления - лаборатории, мастерские, зоны ремонта, наладки и испытания оборудования. В условиях Казахстана кластерный подход может быть применен как в крупных колледжах, так и в компактных городских зданиях. Важно не количество корпусов, а логическая связь помещений внутри профессионального направления.

3. Принцип коротких связей между теорией и практикой

Одним из важных показателей качества планировки колледжа является длина и удобство маршрута между учебными аудиториями и практическими помещениями. Если студенту необходимо проходить через несколько изолированных коридоров, этажей или удаленных блоков, связь теории и практики ослабевает.

В профессиональных образовательных комплексах Китая практические зоны часто включены в основные маршруты движения студентов. Они располагаются рядом с общественными пространствами, внутренними дворами, галереями или центральными холлами. Благодаря этому лаборатории и мастерские становятся не скрытой частью здания, а активным элементом образовательной среды.

Для казахстанских колледжей данный принцип может реализовываться через размещение лабораторий и мастерских на первых этажах, рядом с входными группами, рекреациями, выставочными зонами и учебными аудиториями профильного блока.

4. Принцип общественно-коммуникационного ядра

Современный колледж нуждается в пространстве, которое объединяет разные функциональные зоны здания. Таким ядром может быть вестибюль, атриум, внутренний двор, многофункциональный холл, библиотека-медиатека, выставочная зона или коворкинг.

Общественно-коммуникационное ядро выполняет не только транзитную функцию. Оно связывает студентов, преподавателей и представителей предприятий, формирует среду общения, демонстрации проектов и профессиональной идентификации. В китайских кампусах такую роль часто выполняют центральные дворы, студенческие улицы, общественные оси и ландшафтные пространства.

В казахстанских колледжах общественные зоны часто ограничены вестибюлем, актовым залом или рекреациями. Поэтому при модернизации зданий важно усиливать именно центральные пространства: превращать их в места встреч, выставок, проектной работы и взаимодействия с работодателями [4-6].

5. Принцип открытого учебно-производственного пространства

Учебно-производственные помещения не должны быть полностью закрытыми и изолированными от остальной структуры колледжа. В современной образовательной архитектуре важна визуальная открытость: студент должен видеть процессы обучения, практики, эксперимента и демонстрации оборудования.

Этот принцип может реализовываться через остекленные перегородки, открытые галереи, демонстрационные зоны, смотровые окна в мастерские, выставочные пространства перед лабораториями. Такой прием особенно полезен для повышения интереса к профессии и создания образа современного технологичного колледжа.

Для Казахстана данный принцип может быть применен в колледжах технического, строительного, сервисного, транспортного, аграрного и IT-профиля. Открытость практических зон позволяет показать содержание профессии и сделать учебный процесс более наглядным.

6. Принцип внутреннего двора или защищенного общественного пространства

Внутренний двор является важным планировочным элементом, который может объединять учебные, практические и общественные зоны. В китайских примерах двор часто выполняет роль пространственного центра: вокруг него группируются аудитории, лаборатории, рекреации и общественные помещения. Для Казахстана этот принцип требует климатической адаптации. В северных и центральных регионах открытый двор

может дополняться крытыми галереями, теплыми переходами, остекленными атриумами или защищенными рекреационными пространствами. В южных регионах двор может активнее использоваться как открытая
учебная и общественная зона.

Такой прием позволяет не только улучшить композицию здания, но и создать дополнительные пространства для отдыха, общения, выставок, мастер-классов и проектной деятельности.

7. Принцип гибкости и модернизации

Планировочная структура колледжа должна учитывать возможность изменения образовательных программ, оборудования и технологий. Особенно это касается лабораторий, мастерских, компьютерных классов и проектных аудиторий.

Гибкость может обеспечиваться за счет модульной сетки помещений, универсальных аудиторий, трансформируемых перегородок, резервов инженерных коммуникаций, возможности объединения или разделения кабинетов. Для действующих колледжей Казахстана это особенно важно, так как многие здания были построены под прежние образовательные стандарты и требуют адаптации к новым специальностям.

При проектировании новых колледжей необходимо заранее предусматривать возможность расширения учебно-производственных блоков, добавления лабораторий, переоснащения мастерских и изменения функционального состава помещений.

8. Принцип связи колледжа с городской и производственной средой

Колледж должен рассматриваться как часть городской, социальной и производственной структуры. Его размещение и планировка должны учитывать транспортную доступность, связь с жилыми районами, предприятиями, производственными зонами и общественными пространствами.

В казахстанских условиях данный принцип особенно важен для отраслевых колледжей. Например, колледжи нефтегазового, транспортного, строительного, аграрного или сервисного профиля должны иметь не только учебные помещения, но и пространственную связь с базовыми предприятиями, учебными полигонами, практическими площадками и зонами профессиональной демонстрации, это может выражаться в организации отдельных входов для студентов и партнеров, демонстрационных залов, учебно-производственных дворов, подъездов для техники, зон разгрузки оборудования и пространств для совместных мероприятий с предприятиями.

9. Принцип «кампусной» логики в разных масштабах

В контексте среднего профессионального образования кампусную логику можно понимать как связанную систему учебных, практических, общественных, спортивных и рекреационных пространств.

Даже компактный городской колледж может иметь кампусную организацию, если в его структуре ясно выделены входная зона, учебный блок, практический блок, общественное ядро, двор или рекреационное пространство. В крупных комплексах логика выражается через систему корпусов, общежитий, спортивных зон, студенческих улиц и открытых пространств.

Для Казахстана данный принцип важен потому, что позволяет применять подход не только при новом строительстве, но и при реконструкции существующих колледжей.

Заключение

Проведенное исследование показало, что архитектурно-планировочная организация учреждений среднего профессионального образования Казахстана должна рассматриваться не только через историю развития, ведомственную принадлежность или типологию учебных зданий, но прежде всего через качество пространственной связи между обучением, практикой, производством и общественной средой колледжа.

Сравнительный анализ казахстанских колледжей и китайских профессиональных образовательных комплексов позволил выявить различия в подходах к формированию учебно-производственной среды. В казахстанских примерах уже прослеживается стремление к интеграции учебных корпусов, мастерских, лабораторий, общественных пространств и отраслевой специализации. Однако практические помещения во многих случаях еще сохраняют характер отдельной функциональной зоны. Китайские профессиональные кампусы демонстрируют более целостную планировочную модель, где учебные, лабораторные, производственно-практические, общественные, жилые и спортивные пространства объединяются системой внутренних дворов, общественных осей, функциональных кластеров и коротких маршрутов движения студентов.

На основе анализа определены основные архитектурно-планировочные принципы, актуальные для развития учреждений среднего профессионального образования Казахстана: интеграция учебных и практических зон; функциональное кластерное деление по направлениям подготовки; формирование коротких связей между теорией и практикой; создание общественно-коммуникационного ядра; визуальная и пространственная открытость учебно-производственных помещений; использование внутреннего двора или защищенного общественного пространства; гибкость и возможность модернизации; связь колледжа с городской и производственной средой; развитие «кампусной» логики в разных масштабах.

Практическая значимость исследования заключается в том, что выявленные принципы могут быть использованы при проектировании новых колледжей, реконструкции существующих зданий и разработке рекомендаций по формированию современной учебно-производственной инфраструктуры. Для Казахстана особенно важен не прямой перенос китайского опыта, а адаптация отдельных планировочных приемов к местным социально-экономическим, климатическим, градостроительным и образовательным условиям.

Таким образом, современный колледж должен формироваться как образовательно-производственная платформа, в которой учебные аудитории, лаборатории, мастерские, общественные пространства, дворы и связи с предприятиями образуют единую архитектурную систему. Такой подход позволяет повысить эффективность практико-ориентированного обучения, усилить привлекательность среднего профессионального образования и обеспечить более тесную связь подготовки кадров с потребностями региональной экономики Казахстана.

Вклад авторов

Баймулдина Д.Б. - концепция, сбор данных, анализ и интерпретация результатов. Садыкова С.Ш. - корректировка, научное консультирование, утверждение окончательной версии статьи для публикации.

Список литературы

1. Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан. Техническое и профессиональное, послесреднее образование в Республике Казахстан на начало 2025–2026 учебного года [Электронный ресурс]. – Астана, 2025. – URL: https://stat.gov.kz/ (дата обращения: 01.06.2026).
2. OECD. *Building Future-Ready Vocational Education and Training Systems*. – Paris: OECD Publishing, 2023. – DOI: 10.1787/28551a79-en.
3. Cedefop. *Attractiveness of Initial Vocational Education and Training: Identifying What Matters*. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. – DOI: 10.2801/74821.
4. Barrett P., Davies F., Zhang Y., Barrett L. The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis // *Building and Environment*. – 2015. – Vol. 89. – P. 118–133. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.013.
5. Cleveland B., Fisher K. The evaluation of physical learning environments: A critical review of the literature // *Learning Environments Research*. – 2014. – Vol. 17. – P. 1–28. – DOI: 10.1007/s10984-013-9149-3.
6. Frelin A., Grannäs J. Designing and Building Robust Innovative Learning Environments // *Buildings*. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – Article 345. – DOI: 10.3390/buildings11080345.
7. СНиП РК 3.02-02-2009. Общественные здания и сооружения. – Астана: Агентство Республики Казахстан по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства, 2009.
8. ВСН 51-86. Профессионально-технические, средние специальные и высшие учебные заведения. Нормы проектирования. – Москва: Госгражданстрой, 1986.
9. СП 279.1325800.2016. Здания профессиональных образовательных организаций. Правила проектирования. – Москва: Минстрой России, 2016.
10. Наумов С. Ф. Проблемы архитектурной типологии зданий и комплексов профтехобразования и среднего специального образования: дис. … д-ра архитектуры. – Москва, 1994.
11. Садыкова С. Ш., Длимбетова Г. К. Современные проблемы экологии и формирование экоархитектуры школьных зданий // *QazBSQA Хабаршысы. Сәулет және дизайн*. – 2023. – № 2 (88). – DOI: 10.51488/1680-080X/2023.2-12.
12. Дуйсебай Е. К. Архитектура общественных зданий и сооружений, гибко адаптируемая к динамике социальных перемен: дис. … д-ра архитектуры. – Казахстан, 2005. – 303 с.
13. Zhou Y., Xu G. Vocational School–Enterprise Cooperation in China: A Review of Policy Reforms, 1978–2022 // *ECNU Review of Education*. – 2023. – Vol. 6, No. 3. – P. 433–450. – DOI: 10.1177/20965311231167895.
14. Zhao D., Selvaratnam D. P. A systematic literature review on the reform of vocational education in China // *Cogent Education*. – 2024. – Vol. 11, No. 1. – Article 2343525. – DOI: 10.1080/2331186X.2024.2343525.
15. Archina. Meizhouwan Vocational Technology College Relocation Project / Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research (ZIAD) [Электронный ресурс]. – URL: https://www.archina.com/index.php?a=show&g=works&id=159202&m=index (дата обращения: 01.06.2026).

16. Gold Mantis. Qingdao University of Science and Technology (Zibo Campus). Project materials [Электронный ресурс]. – URL: https://www.goldmantis.com/en/projects/209 (дата обращения: 01.06.2026).
17. APEC PetroTechnic Higher College. Official website [Электронный ресурс]. – URL: https://apec.edu.kz/ (дата обращения: 01.06.2026).
18. Колледж сервиса и туризма акимата города Астаны. Официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: https://ksit.edu.kz/ru/ (дата обращения: 01.06.2026).

D.B. Baimuldina, S.Sh. Sadykova

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Principles of Architectural and Spatial Planning of Secondary Vocational Education Institutions in Kazakhstan

Abstract. The article examines the principles of architectural and spatial planning for secondary vocational education institutions in Kazakhstan in the context of modernization of technical and vocational education and stronger links between learning and industrial practice. The study addresses the transition from the traditional college model to an educational and production complex integrating theoretical instruction, practical training, public spaces and cooperation with industry. The methodology is based on a comparative architectural and planning analysis of Kazakhstan colleges, including APEC PetroTechnic in Atyrau and the College of Service and Tourism in Astana, and Chinese vocational education complexes, including Zibo Education and Meizhou Bay Vocational and Technical College. The analysis identifies key principles: integration of educational and production zones, formation of a social and communication core, functional clustering, short links between theory and practice, flexibility of the planning structure, and openness to the urban and industrial environment. These principles support the development of Kazakhstan colleges as modern educational and production platforms.

Keywords: secondary vocational education; college architecture; Kazakhstan; China; architectural and spatial planning; vocational education institutions; educational and production environment; campus.

References

1. Byuro nacional'noj statistiki Agentstva po strategicheskomu planirovaniyu i reformam Respubliki Kazahstan. Tekhnicheskoe i professional'noe, poslesrednee obrazovanie v Respublike Kazahstan na nachalo 2025–2026 uchebnogo goda [Elektronnyj resurs]. – Astana, 2025. – URL: https://stat.gov.kz/ (data obrashcheniya: 01.06.2026).
2. OECD. Building Future-Ready Vocational Education and Training Systems. – Paris: OECD Publishing, 2023. – DOI: 10.1787/28551a79-en.
3. Cedefop. Attractiveness of Initial Vocational Education and Training: Identifying What Matters. – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2014. – DOI: 10.2801/74821.

4. Barrett P., Davies F., Zhang Y., Barrett L. The impact of classroom design on pupils' learning: Final results of a holistic, multi-level analysis // Building and Environment. – 2015. – Vol. 89. – P. 118–133. – DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.02.013.
5. Cleveland B., Fisher K. The evaluation of physical learning environments: A critical review of the literature // Learning Environments Research. – 2014. – Vol. 17. – P. 1–28. – DOI: 10.1007/s10984-013-9149-3.
6. Frelin A., Grannäs J. Designing and Building Robust Innovative Learning Environments // Buildings. – 2021. – Vol. 11, No. 8. – Article 345. – DOI: 10.3390/buildings11080345.
7. SNiP RK 3.02-02-2009. Obshchestvennye zdaniya i sooruzheniya. – Astana: Agentstvo Respubliki Kazahstan po delam stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva, 2009.
8. VSN 51-86. Professional'no-tekhnicheskie, srednie special'nye i vysshie uchebnye zavedeniya. Normy proektirovaniya. – Moskva: Gosgrazhdanstroj, 1986.
9. SP 279.1325800.2016. Zdaniya professional'nyh obrazovatel'nyh organizacij. Pravila proektirovaniya. – Moskva: Minstroj Rossii, 2016.
10. Naumov S. F. Problemy arhitekturnoj tipologii zdanij i kompleksov proftekhobrazovaniya i srednego special'nogo obrazovaniya: dis. … d-ra arhitektury. – Moskva, 1994.
11. Sadykova S. SH., Dlimbetova G. K. Sovremennye problemy ekologii i formirovanie ekoarhitektury shkol'nyh zdanij // QazBSQA Habarshysy. Səulet zhəne dizajn. – 2023. – № 2 (88). – DOI: 10.51488/1680-080X/2023.2-12.
12. Dujsebaj E. K. Arhitektura obshchestvennyh zdanij i sooruzhenij, gibko adaptiruemaya k dinamike social'nyh peremen: dis. … d-ra arhitektury. – Kazahstan, 2005. – 303 s.
13. Zhou Y., Xu G. Vocational School–Enterprise Cooperation in China: A Review of Policy Reforms, 1978–2022 // ECNU Review of Education. – 2023. – Vol. 6, No. 3. – P. 433–450. – DOI: 10.1177/20965311231167895.
14. Zhao D., Selvaratnam D. P. A systematic literature review on the reform of vocational education in China // Cogent Education. – 2024. – Vol. 11, No. 1. – Article 2343525. – DOI: 10.1080/2331186X.2024.2343525.
15. Archina. Meizhouwan Vocational Technology College Relocation Project / Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research (ZIAD) [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.archina.com/index.php?a=show&g=works&id=159202&m=index (data obrashcheniya: 01.06.2026).
16. Gold Mantis. Qingdao University of Science and Technology (Zibo Campus). Project materials [Elektronnyj resurs]. – URL: https://www.goldmantis.com/en/projects/209 (data obrashcheniya: 01.06.2026).
17. APEC PetroTechnic Higher College. Official website [Elektronnyj resurs]. – URL: https://apec.edu.kz/ (data obrashcheniya: 01.06.2026).
18. Kolledzh servisa i turizma akimata goroda Astany. Oficial'nyj sajt [Elektronnyj resurs]. – URL: https://ksit.edu.kz/ru/ (data obrashcheniya: 01.06.2026).

Сведения об авторах

Баймулдина Динара Бауржановна – автор для корреспонденции, докторант кафедры «Архитектура» архитектурно-строительного факультета, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.
Садыкова Сара Шангереевна – кандидат архитектуры, ассоциированный профессор, Почетный архитектор Республики Казахстан, преподаватель кафедры «Архитектура»

архитектурно-строительного факультета, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Dinara Baurzhanovna Baimuldina – corresponding author, PhD student, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Construction, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.
Sara Shangereevna Sadykova – Candidate of Architecture, Associate Professor, Honorary Architect of the Republic of Kazakhstan, Lecturer, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Construction, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Научная статья https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-120-138

Расчёт, контроль и анализ в управлении складскими запасами

С.Ж. Кабикенов*, В.В. Шалаев, Г.В. Киселёва, С.Ю. Кутьенко

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», Караганда, Казахстан

E mail: *s.kabikenov@ktu.edu.kz, shalaev_v@mail.ru, galkisseleva@yandex.kz, 83007450039@mail.ru*

Аннотация. В статье рассмотрены возможности применения электронных таблиц Excel для контроля, анализа и управления складскими запасами в логистических системах. Цель исследования заключается в разработке и обосновании практических подходов к оценке эффективности управления запасами на основе инструментов Excel и современных методов логистического анализа. Основными направлениями исследования являются расчёт оптимального и среднего уровня запасов, оценка товарооборачиваемости, анализ уровня сервиса поставок, а также использование ABC- и XYZ-анализа для классификации товарных групп. Научная значимость работы состоит в комплексном применении статистических и логистических методов для повышения качества управленческих решений. Методология исследования основана на использовании экономико-математических методов, статистического анализа, коэффициентов вариации, осцилляции, асимметрии и эксцесса с последующей визуализацией результатов средствами Excel. В результате разработана универсальная модель анализа запасов, позволяющая выявлять нестабильность спроса, оценивать риски дефицита и избыточных запасов, а также оптимизировать процессы пополнения. Практическое значение исследования заключается в возможности использования предложенной модели для повышения эффективности складской логистики, снижения издержек и улучшения качества управления материальными потоками.

Ключевые слова: складские запасы, электронные таблицы Excel, ABC-анализ, XYZ-анализ, тренд, коэффициент вариации, коэффициент осцилляции.

Received 01.07.2026. Revised 18.09.2026. Accepted 21.09.2026. Available online 30.06.2026

* the correspondence author

Введение

Управление складскими запасами является одной из ключевых задач современной логистики [3,7,8]. В условиях нестабильного рыночного спроса и возрастающей конкуренции эффективный контроль уровня товарных запасов определяет как операционную устойчивость предприятия, так и его финансовые результаты [3,4,12]. Избыточные запасы ведут к иммобилизации оборотного капитала, росту складских издержек и рискам устаревания продукции, тогда как их дефицит снижает уровень клиентского сервиса и влечёт потерю заказов [1,2,3]. Несмотря на значительный объём теоретических и прикладных исследований в области управления запасами, ряд вопросов остаётся недостаточно проработанным, несмотря на активное развитие данной проблематики в зарубежных публикациях последних лет, индексируемых в базах Scopus и Web of Science [16,17,18]. В частности, нерешёнными являются проблемы комплексной статистической оценки стабильности запасов с применением нескольких взаимодополняющих инструментов, а также адекватного учёта стохастической природы логистических процессов при формировании стратегий пополнения. Цель настоящей статьи — разработка и обоснование методических подходов к расчёту, контролю и комплексному анализу складских запасов на основе совокупности статистических показателей.

Учёт и контроль запасов материальных товаров на складе является важной составляющей логистического процесса, что позволяет объективно учитывать динамику движения запасов, планировать оперативную работу, прогнозировать поставки и отправку товаров, вести учёт.

Методология

Объектом исследования является система управления складскими запасами торгово-логистического предприятия. Предмет исследования — совокупность количественных показателей, характеризующих динамику, стабильность и распределение запасов. В качестве материала исследования использованы данные о поступлении и убытии товаров по 18 ассортиментным группам с суммарным объёмом от 61 до 1 093 т по группе за наблюдаемый период не менее 12 недель, что обеспечивает статистическую достоверность результатов. Новизна работы состоит в применении комплексного методического подхода, интегрирующего в единой аналитической системе: (1) расчёт оптимального, страхового и среднего запасов; (2) оценку товарооборачиваемости и готовности к поставке; (3) ABC-анализ на основе принципа Парето; (4) XYZ-анализ через коэффициент вариации CV; (5) построение совмещённой матрицы ABC–XYZ; (6) коэффициент осцилляции как индикатор нестабильности; (7) анализ формы распределения данных по коэффициентам асимметрии и эксцесса относительно нормального закона Гаусса. Все расчётные модели реализованы в среде Microsoft Excel, что обеспечивает воспроизводимость и практическую доступность методики без специализированного программного обеспечения [1,2,15].

Оптимальный запас Z_{opt} на складе рассчитывается по формуле:

$$Z_{opt} = P_{sr} \times N_{zap} + U^{sz}_{post} + U^{sz}_{vsp}, \quad (1)$$

где P_{sr} – средние продажи

N_{zap} – количество недель запаса, на которое формируется запас (это количество зависит от частоты поставок (предположим, что размещение заказов
на поставку продукции происходит каждые 2 недели);

U^{sz}_{post} – уровень страхового запаса на случай сбоев в поставках (рассчитывается с помощью умножения средних недельных продаж на имеющийся период в сбоях; в нашем случае 4 шт. умножаем на 1 неделю сбоев в поставках и получаем страховой запас на уровне 4 шт.).

U^{sz}_{vsp} — уровень страхового запаса на случай всплесков в продажах рассчитывается с помощью умножения средних недельных продаж P^{sr}_{nd} на коэффициент вариации CV.

Например:

$$U^{sz}_{vsp} = P^{sr}_{nd} \times CV = 4 \text{ ед.} \times 0{,}84 = 3{,}35 \text{ ед} \quad (2)$$

Z^{sr} – средний запас на складе. Показатель может определяться как в натуральном, так и в стоимостном выражении, как в целом по складу, так и по группам товаров. В общем случае запас является постоянно меняющейся величиной. Поэтому для характеристики уровня запаса рассчитывают средний запас, используя при этом формулу средней хронологической:

$$Z^{sr}_i = (Z^n_i + Z^k_i) / 2, \quad (3)$$

где Z^{sr}_i — средний запас за выбранный период;

Z^n_i — запас на начало выбранного периода;

Z^k_i — запас на конец выбранного периода.

Средний запас за несколько периодов определяется как средняя арифметическая из средних запасов за каждый из периодов:

$$\sum Z^{sr}_i = (Z^{sr}_1 + Z^{sr}_2 + \ldots + Z^{sr}_n) / n, \quad (4)$$

где $\sum Z^{sr}_i$ — средний запас за n периодов.

Товарооборачиваемостъ — характеристика процесса возобновления товарных запасов. Определяется с помощью двух показателей: скорость товарооборота и время обращения товаров.

Скорость товарооборота ($V^{tvo}i$) показывает, сколько раз в течение выбранного одного периода продаётся и возобновляется имеющийся товарный запас [3,8]. Показатель определяется числом оборотов запаса в течение одного периода:

$$V^{tvo}i = Oi / Z^{sr}_i \ , \quad (5)$$

где Oi — товарооборот за выбранный период;

Z^{sr}_i — средний товарный запас за выбранный период.

Для торговой системы следует учитывать чистый оборот, т. е. без учёта внутрисистемного оборота. Скорость товарооборота может рассчитываться по отдельным складам, по отдельным позициям ассортимента. Если запас является производственным, то расчётный показатель будет называться скоростью оборота, который может рассчитываться отдельно по каждому виду ресурсов.

Время обращения товаров (Ti) показывает продолжительность выбранного периода, в течение которого реализуется запас, время нахождения товаров в сфере обращения или на складе торгового предприятия. Определяется по формуле:

$$Ti = (Z^{sr}_i \times t) / Oi, \quad (6)$$

где Z^{sr}_i — средние товарные запасы за выбранный период;
t — число дней в выбранном периоде;
O_i – товарооборот.

Товарооборот здесь также должен быть освобождён от повторного счета. Следует отметить, что снижение Ti позволяет эффективно использовать оборотные средства и экономить издержки обращения. Показатель времени обращения товаров обратно пропорционален показателю скорости товарооборота $V^{tvo}i$, т.е.

$$Ti = t / V^{tvo}i \quad (7)$$

Показатель G_{post} «Готовность к поставке» можно использовать как для оценки собственного уровня сервиса, так и для уровня сервиса, оказываемого поставщиком. Ниже приводятся три метода расчёта готовности к поставке, используемые в логистике [3,4].

$$G_{post} = Q_{vz} / Q_{tot} \times 100\%, \quad (8)$$

где Q_{vz} — число выполненных заказов;
Q_{tot} — общее число поступивших заказов.

$$G_p = m / M \times 100\%, \quad (9)$$

где m — фактический объем поставок в количественном выражении;
M — объем заказа в количественном выражении.

$$G_p = C_{fakt} / C_{zak}, \quad (10)$$

где C_{fakt} — стоимость фактически реализованного товара;
C_{zak} — суммарная стоимость заказанного товара

Доля запасов в обороте (Bzap):

$$B_{zap} = Z_{sr} / O \times 100\%. \quad (11)$$

Затраты на связанный капитал (Ksvz). Данный показатель характеризует объем омертвлённого в запасах капитала:

$$К_{svz} = (З_{sr} \times t_{hr} \times К) / 100\%, \quad (12)$$

где t_{hr} — период времени, в течение которого хранится запас;
К — процентная ставка на капитал.

Коэффициент вариации (CV) — один из самых удобных и наглядных показателей, чтобы понять, насколько стабильны или нестабильны запасы на складе, особенно если речь идёт о спросе на товары [5,6,18]. CV рассчитывается как отношение стандартного отклонения спроса к его среднему значению **μ**. Он показывает относительную изменчивость спроса и насколько предсказуемо ведут себя запасы (см. табл. 1).

$$CV = sko/\mu, \quad (13)$$

где sko – среднеквадратичное отклонение спроса;
μ – математическое ожидание (среднее значение спроса).

Таблица 1. Показатели спроса на товар в зависимости от CV и категории товара

Категория товара	Значение CV	Характер спроса	Значимость для склада
X	<10%	Очень стабильный	Можно держать минимальные запасы, низкий риск дефицита
Y	10% - 30%	Умеренная вариативность	Нужен более гибкий подход к пополнению
Z	=>30%	Высокая нестабильность	Требуется повышенный уровень страхового запаса

Результаты и Обсуждение

Применение разработанной методологии к исходному массиву данных позволило получить следующие результаты. По значениям коэффициента вариации все 18 ассортиментных позиций распределены по трём категориям устойчивости спроса (таблица 1): 11 позиций отнесены к категории X (CV < 10 % — стабильный спрос), 4 позиции — к категории Y (CV = 10–30 % — умеренная вариативность), 2 позиции — к категории Z (CV ≥ 30 % — высокая нестабильность). По объёму товарооборота в соответствии с принципом Парето [7,9,14,16,18]: группа A — позиции 1–6 (кумулятивная доля до 79,5 %); группа B — позиции 7–15 (до 95,7 %); группа C — позиции 16–18. Совмещённая матрица ABC–XYZ (таблица 3) показывает, что ячейка AX занята шестью позициями (1–6) с высоким товарооборотом и стабильным спросом — это наиболее управляемый и доходный сегмент запасов, требующий минимального страхового запаса. Ячейка BX включает пять позиций (7, 11, 13, 14, 15) — средний приоритет с предсказуемым спросом. Ячейки CZ (позиция 17) и BZ (позиция 10) характеризуются высокой нестабильностью при малом объёме: для них целесообразен переход на модель снабжения по заявкам. Незаполненные ячейки матрицы (AY, AZ, CX) указывают на структурные резервы: возможности расширения ассортимента в высокопотенциальных сегментах остаются нереализованными. Коэффициент осцилляции, рассчитанный по формулам (10.4.13)–(10.4.15), подтвердил выводы XYZ-анализа: позиции категории Z демонстрируют наибольший размах колебаний запаса относительно среднего уровня, что требует увеличения страхового запаса и перехода к адаптивным моделям пополнения. Анализ коэффициентов асимметрии (g_1) и эксцесса (g_2) для выборок спроса показал отклонение фактических распределений от нормального закона Гаусса: значения $g_1 \neq 0$ свидетельствуют об асимметричности данных, что необходимо учитывать при расчёте страхового запаса и прогнозировании спроса. Графическая визуализация

результатов (рисунки к статье) подтверждает статистически значимое отклонение фактической выборки от идеального ЗНР.

При анализе расчётных значений коэффициента вариации по отдельным группам товаров в зависимости от рекомендуемого интервала группы товаров распределяются на три категории X, Y, Z [8,14].

Вывод: чем больше CV, тем выше уровень разброса вариативности спроса, что снижает эффективность работы склада, порождает больший уровень неопределённости при принятии решения и, как следствие, должен увеличиться страховой запас, – растут издержки складских операций.

Организация XYZ-анализа товара по группам как функционала от CV даёт возможность системно подойти к решению таких вопросов, как рациональная организация складирования, выбор наиболее оптимальной стратегии пополнения запасов и оптимизация уровня запасов. По сути, коэффициент вариации CV — это быстрый индикатор того, насколько высок уровень риска для склада. Оптимальная стратегия управления запасами минимизирует величину запаса и определяет такую периодичность заказов, которая позволяет прогнозировать процесс пополнения с высокой степенью вероятности событий.

Но для статистической обработки данных по коэффициенту корреляции требуется не разовый сбор данных, а в течение установленного интервала времени. Чем больше временной интервал, тем точнее и вероятнее получаемые результаты. Обычно принимается или недельный интервал как законченная часть логистического процесса или обрабатываются данные за календарный месяц.

Наряду с XYZ-анализом выполняется ABC-анализ, который систематизирует поступающий товар с учётом принципа Парето, используя сортировку данных по направлению убывания показателей прибытия товара и вычисления кумулятивного накопления по трём группа: группа товаров «A» – кумулятивное значение до 80% поступления; группа «B» – от 80% до 96%; остальные товары – группа «C».

В каждом виде анализа всего три возможных варианта распределения товара, обрабатываемого на складе при поступлении и убытии. Применив принцип совместимости по объекту обработки – виды товара, можно построить комплексную матрицу, в которой по столбцам ABC располагаются товары данного анализа на горизонтальных уровнях по строкам XYZ, табл. 2.

Цифрами внутри таблицы указаны позиции ассортимента из таблицы 2. Заполнение ячеек AX, AY, BX позициями ассортимента является наиболее предпочтительным, т.к. это ячейки, в которые попадают товары, сильно влияющие на показатели эффективности работы склада, дающие максимальный эффект. Ячейки AZ, BY, CX относятся к среднему уровню. Эти товары оказывают меньшее влияние на эффективность работы склада. И третья группа ячеек BZ, CZ, CY оказывает минимальное влияние ввиду малочисленности позиций ассортимента и объёма грузообработки [8,12,14]. Эти товары используют ресурсы склада, оказывая минимальное влияние на общие показатели работы склада, но в общем зачёте имеется эта доля издержек. В настоящее время стараются по таким группам товаров применить метод, позволяющий удовлетворить спрос на основании заявок, что высвобождает имеющийся ресурс для более загруженной части товара. По данной комплексной матрице очень хорошо видно, что отдельные ячейки, имеющие высокий потенциал, вообще не загружены, следовательно, это означает только упущенные

возможности, и они являются потенциальным резервом для улучшения показателей работы склада.

Данная матрица содержит уже девять ячеек, в которых размещены товары из анализируемых групп, и вариативность аналитических выводов расширяется, причём с учётом влияния как процессов поставки, так и убытия. Такой комплексный подход моделирования позволяет визуализировать как положительные стороны процесса, так и его недостатки. Объективность корректировки последующих решений повышает эффективность логистики и снижение издержек.

Таблица 2. Данные для организации комплексной матрицы совместного анализа

ABC-анализ					XYZ-анализ			
АГ	Qi, т	bi,%	Кумулятив, %	группа	АГ	Gi, т	CV	Группа товара
1	1093	21,2%	21,2%	A	1	1169	4,9%	X
2	957	18,6%	39,8%	A	2	962	8,2%	X
3	826	16,0%	55,8%	A	3	868	6,7%	X
4	609	11,8%	67,6%	A	4	578	7,8%	X
5	500	9,7%	77,3%	A	5	499	6,4%	X
6	114	2,2%	79,5%	A	6	110	9,1%	X
7	108	2,1%	81,6%	B	7	107	9,3%	X
8	107	2,1%	83,7%	B	8	97	12,4%	Y
9	103	2,0%	85,7%	B	9	82	12,2%	Y
10	95	1,8%	87,5%	B	10	80	30,0%	Z
11	92	1,8%	89,3%	B	11	90	6,7%	X
12	90	1,7%	91,0%	B	12	84	11,9%	Y
13	85	1,7%	92,7%	B	13	86	3,5%	X
14	79	1,5%	94,2%	B	14	81	8,6%	X
15	79	1,5%	95,7%	B	15	79	2,5%	X
16	73	1,4%	97,1%	C	16	72	16,7%	Y
17	69	1,3%	98,4%	C	17	86	25,6%	Z
18	68	1,3%	99,7%	C	18	61	13,1%	Y

Примечание: АГ – ассортиментные группы товаров (в сводной таблице они должны быть по строкам синхронизированы)

В логистике большинство процессов имеют стохастический характер, что затрудняет контроль, стабильность выводов по показателям, составление прогнозов, разработку планов и поэтому базироваться только на единичном количестве показателей нежелательно. Для анализа логистических процессов необходимо применять не один канал получения информации о ходе процесса, а несколько. Если применить несколько другую методику и получить или прямые или косвенные подтверждения выводов по предыдущему варианту, то принимаемые решения по совершенствованию процессов будут более мотивированы и обоснованы.

Одним из таких показателей является коэффициент осцилляции [10,11], (или показатель колебаний), который отражает амплитуду и частоту колебаний запасов относительно их среднего уровня. Он показывает, насколько сильно система «раскачивается» из-за:

- задержек поставок,
- слишком агрессивной реакции на изменения спроса,
- неэффективных правил пополнения.

Таблица 3. Комплексная матрица совместного анализа запасов на складе

Группа	A	B	C
X	1,2,3,4,5,6	7,11,13,14,15	Нет
Y	Нет	8,9,12	16,18
Z	Нет	10	17

По сути, это количественная мера нестабильности запасов – чем больше эта величина, тем менее стабилен запас, и тогда требуется увеличение страхового запаса. Коэффициент осцилляции в статистике — это относительный размах вариации: доля размаха (max–min) в среднем значении выборки данных и является относительной мерой абсолютного разброса значений в статистической совокупности. Для расчёта коэффициента осцилляции необходимо вычислить среднее значение выборки при i от 1 до n значений.

$$Xsr = \sum Xi \,/\, n, \tag{14}$$

где $\sum Xi$ – сумма всех значений выборки;
n – количество значений данных в выборке;
Xsr – среднее значение выборки.

Размах определяется как разность максимального и минимального значения.

$$R = X_{max} - X_{min}, \tag{15}$$

где X_{max} – максмальное значение в выборке;
X_{min} – минимальное значение в выборке;
R – размах значений выборки.

Величина коэффициента осцилляции в долях или в % рассчитывается по формуле 16.

$$K_{osc} = R \,/\, X_{sr}; \qquad K_{osc} = R \times 100\% \,/\, X_{sr}, \% \tag{16}$$

Как основной показатель для оценки запасов на складе коэффициент осцилляции слабый, т.к. связан только с двумя крайними значениями (минимум и максимум) и средним значением выборки. Для складских запасов это проблема, потому что один выброс (разовая крупная или пропущенная поставка) резко увеличивает показатель. Этот показатель также не учитывает частоту поставок: один день на нуле и 20 дней на нуле дадут одинаковые min/max. Кроме того, показатель не чувствителен к динамике процесса, сезонности поставок, к колебаниям спроса (например, интервентный спрос – это искусственно созданный спрос, используемый как инструмент регулирования рынка). Не отвечает также на главный вопрос управления запасами: какой уровень сервиса и риск дефицита (сколько заказов/дней мы не закрыли).

Но при предварительном анализе логистического процесса данный показатель позволяет получить частичную информацию, т.к. характеризует размах запаса, что влияет на стабильность управления запасами, и поэтому его можно использовать как быстрый “красный флаг” для проверки, если:

– запасы по позиции сильно отличаются относительно среднего;
– есть подозрение на «провалы» до нуля или резкие переполнения;
– требуется проверить фиксированные интервалы (например, последние 30/90 дней);
– возникает необходимость проверить стабильные процессы (без крупных разовых закупок и разовых списаний)».

Для оценки запасов как управляемой системы (сервис, дефициты, излишки) коэффициент осцилляции не годится, но как быстрый индикатор стабильности может быть полезен.

Рассмотрим, как осцилляции влияют на контроль запасов [2,15]:

1. Рост амплитуды колебаний способствует росту страховых запасов. Если коэффициент осцилляции высок, запасы то резко растут, то падают. Чтобы избежать дефицита, компании вынуждены держать большие страховые запасы, что увеличивает замороженный капитал, складские расходы, риск списаний, что способствует увеличению издержек при формировании запасов.

2. Усиление так называемого эффекта хлыста (bullwhip effect) – это явление в цепочках поставок, при котором небольшие колебания конечного потребительского спроса приводят к усиленным искажениям заказов на каждом последующем уровне цепи (розница → оптовик → производитель → поставщик сырья). Исследования показывают, что осцилляции часто возникают из-за перерегулирования — слишком сильной реакции на небольшие изменения спроса, что приводит к резким скачкам заказов, перегрузке поставщиков, нестабильности всей цепи поставок.

Высокий коэффициент осцилляции означает, что прогнозы спроса, стандартные методы планирования становятся менее надёжными и требуется переход к адаптивным моделям.

Колебания запасов, показанные коэффициентом осцилляции, вызывают частые корректировки заказов, увеличение транспортных расходов, переработки персонала, нестабильность производственного графика. Это всё даёт рост операционных издержек.

Несмотря на кажущуюся простоту определения коэффициента осцилляции, это поможет увидеть, как небольшое изменение спроса вызывает большие колебания заказов, как изменение параметров (время поставки, коэффициент сглаживания) контролируется в

сторону уменьшения осцилляции. Это классический подход, применяемый в исследованиях по динамике цепей поставок.

Изменение коэффициента осцилляции показывает на изменение затрат: чем выше осцилляции, тем выше затраты на запасы [10,11]. В общем коэффициент осцилляции позволяет:

- оценить устойчивость системы управления запасами,
- выявить эффект «хлыста»,
- определить необходимость изменения политики пополнения,
- показать связь между колебаниями и затратами,
- обосновать переход к более стабильным алгоритмам управления.

При анализе распределения данных в выборке по отношению к Закону нормального распределения Гаусса (ЗНР) рассматриваются коэффициент асимметрии и коэффициент эксцесса [5,6]. Данный анализ позволяет выявлять закономерности, связанные с частотой встречающихся различных значений. В идеальном графике ЗНР данные расположены симметрично относительно среднего значения, и среднее значение совпадает с медианой. В исследуемых выборках данных возможно другое распределение данных относительно среднего значения, и, как правило, медиана не совпадает со средним значением данных в выборке.

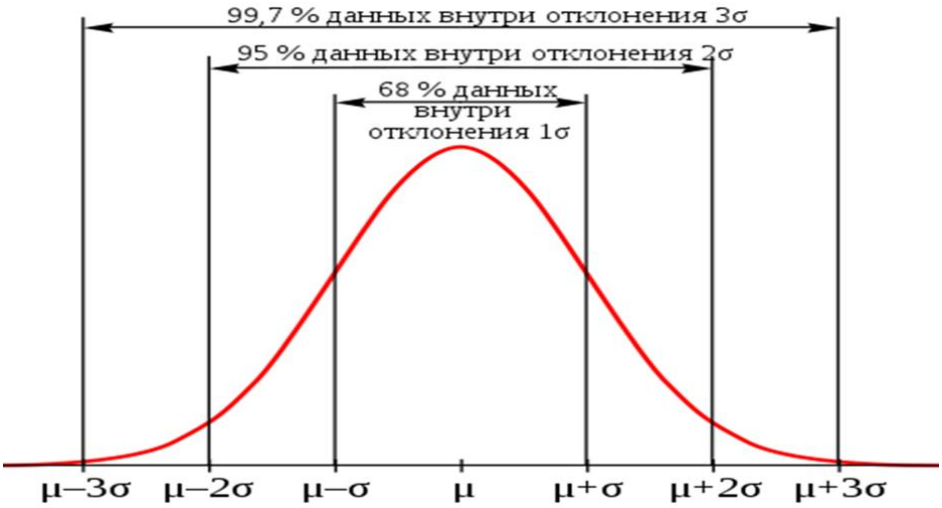


Рисунок 1. График данных по закону нормального распределения Гаусса

Значение и смещение асимметрии вычисляется по формуле:

$$g_1 = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (17)$$

,

где: n – объём выборки;
Xi – наблюдения;
Xср – среднее арифметическое;
s – стандартное отклонение.

Если: g1 = 0, тогда распределение симметрично;

g1 > 0, тогда распределение имеет «правостороннюю асимметрию;
g1 < 0, тогда распределение имеет «левостороннюю асимметрию.

Коэффициент эксцесса вычисляется по формуле 18:

$$g_2 = \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (18)$$

Если: g2 = 0, тогда распределение по «пиковости» совпадает с нормальным;
g2 > 0, тогда более «острое» распределение;
g2 < 0, тогда более «плоское» распределение.

Коэффициент эксцесса характеризует меру «плоскости» распределения данных, т.е. позволяет понять, насколько исследуемое распределение отличается от нормального распределения по высоте и ширине.

Математическая модель расчёта данных коэффициентов с визуализацией полученных результатов позволяет провести такое исследование и сделать определённые выводы по рассматриваемому варианту. Модель разработана на базе электронных таблиц ”EXCEL”, она универсальна и позволяет исследовать различные варианты распределений.

Так как логистические процессы складских работ имеют стохастический характер, в данной представленной математической модели для исследования показателей в качестве исходных данных содержатся количественные показатели, сформированные при помощи генератора случайных чисел стандартной процедуры электронных таблиц «Excel».

В данной работе приводится пример проведённого исследования в виде полной таблицы и графиков по полученным результатам расчётов.

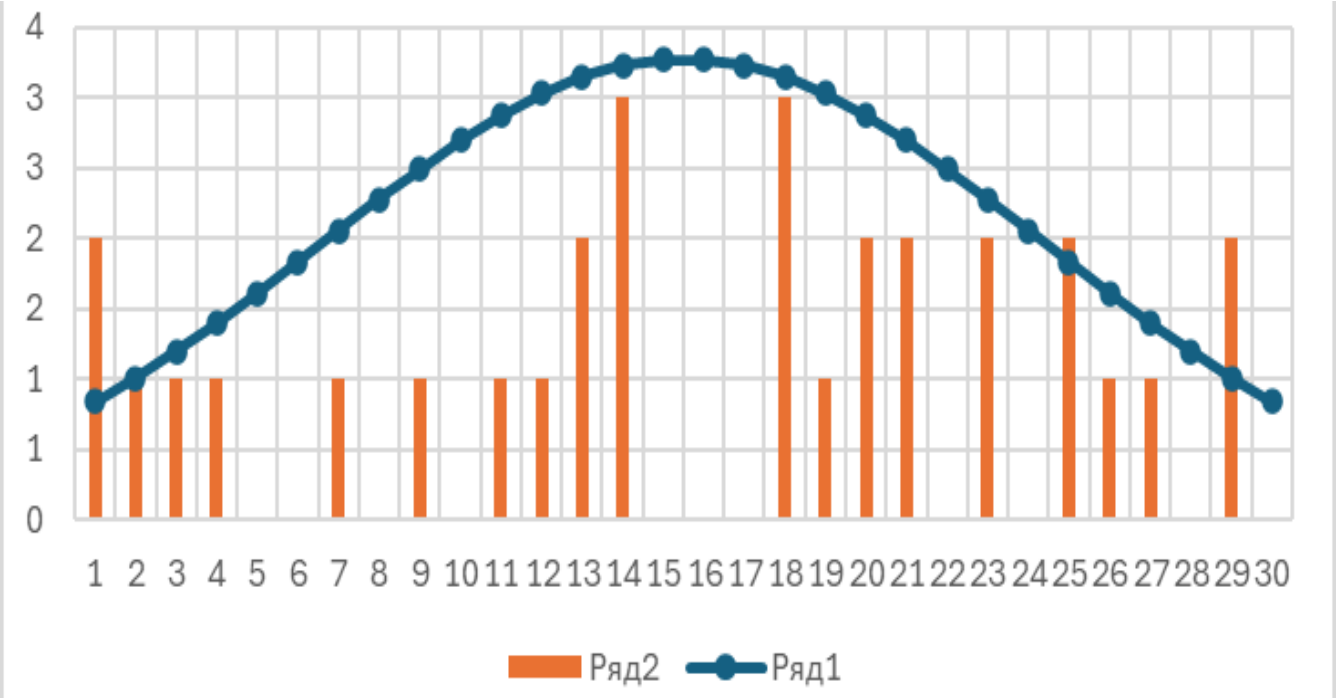


Рисунок 2. Совмещённый график идеального ЗНР (сплошная линия) и частоты фактических данных (гистограмма)

Таблица 4. Математическая модель расчёта коэффициентов асимметрии и эксцесса

№ набл.	Факт. выборка	Значение норм. распр.	Для графика факт. выборки	Ст_откл. в кубе	Ст_откл. в 4 степени	Данные для графика ЗНР	Значение норм. распр.	для графика идеал. выборки	Частота для гистогр.
1	50	0,0055100	0,83	-5,79	10,39	50	0,0070316	0,84	2
2	52	0,0069979	1,05	-4,55	7,54	51,66	0,0084237	1,01	1
3	52	0,0069979	1,05	-4,55	7,54	53,32	0,0099622	1,20	1
4	53	0,0078299	1,17	-4,00	6,36	54,98	0,0116305	1,40	1
5	55	0,0096625	1,45	-3,04	4,41	56,64	0,0134042	1,61	0
6	60	0,0150307	2,25	-1,34	1,48	58,30	0,0152503	1,83	0
7	63	0,0184982	2,77	-0,72	0,64	59,96	0,0171283	2,06	1
8	65	0,0207405	3,11	-0,43	0,33	61,62	0,0189908	2,28	0
9	69	0,0246159	3,69	-0,11	0,05	63,28	0,0207860	2,49	1
10	70	0,0253869	3,81	-0,07	0,03	64,94	0,0224592	2,70	0
11	70	0,0253869	3,81	-0,07	0,03	66,60	0,0239559	2,87	1
12	73	0,0270583	4,06	-0,01	0,00	68,26	0,0252248	3,03	1
13	73	0,0270583	4,06	-0,01	0,00	69,92	0,0262204	3,15	2
14	73	0,0270583	4,06	-0,01	0,00	71,58	0,0269059	3,23	3
15	79	0,0270065	4,05	0,01	0,00	73,24	0,0272553	3,27	0
16	80	0,0265486	3,98	0,02	0,01	74,90	0,0272553	3,27	0
17	80	0,0265486	3,98	0,02	0,01	76,56	0,0269059	3,23	0
18	81	0,0259737	3,90	0,04	0,02	78,22	0,0262204	3,15	3
19	83	0,0245060	3,68	0,12	0,06	79,88	0,0252248	3,03	1
20	83	0,0245060	3,68	0,12	0,06	81,54	0,0239559	2,87	2
21	84	0,0236330	3,54	0,17	0,10	83,20	0,0224592	2,70	2
22	85	0,0226821	3,40	0,25	0,16	84,86	0,0207860	2,49	0
23	88	0,0194843	2,92	0,58	0,49	86,52	0,0189908	2,28	2
24	89	0,0183451	2,75	0,74	0,67	88,18	0,0171283	2,06	0
25	91	0,0160305	2,40	1,14	1,18	89,84	0,0152503	1,83	2
26	92	0,0148777	2,23	1,38	1,53	91,50	0,0134042	1,61	1
27	93	0,0137419	2,06	1,65	1,95	93,16	0,0116305	1,40	1
28	95	0,0115562	1,73	2,30	3,04	94,82	0,0099622	1,20	0
29	98	0,0085972	1,29	3,57	5,45	96,48	0,0084237	1,01	2
30	99	0,0077157	1,16	4,07	6,51	98,14	0,0070316	0,84	0
Xср. =	**76**			-8,53	60,03	**74**	**K_{Pirson}**	**Коэффициент масшт.**	
СКО=	**14,4**	**Ассим расч.=**		**-0,32**	**-0,79**	**14,6**	**0,99**	**4**	
Медиана =	**79,5**			пр/стор	плоская	**K_{Pirson}**	**0,99**		
Смещение М	**3,6**	**Ассим станд.=**		**-0,30**	**-0,96**	**Это проверка**			

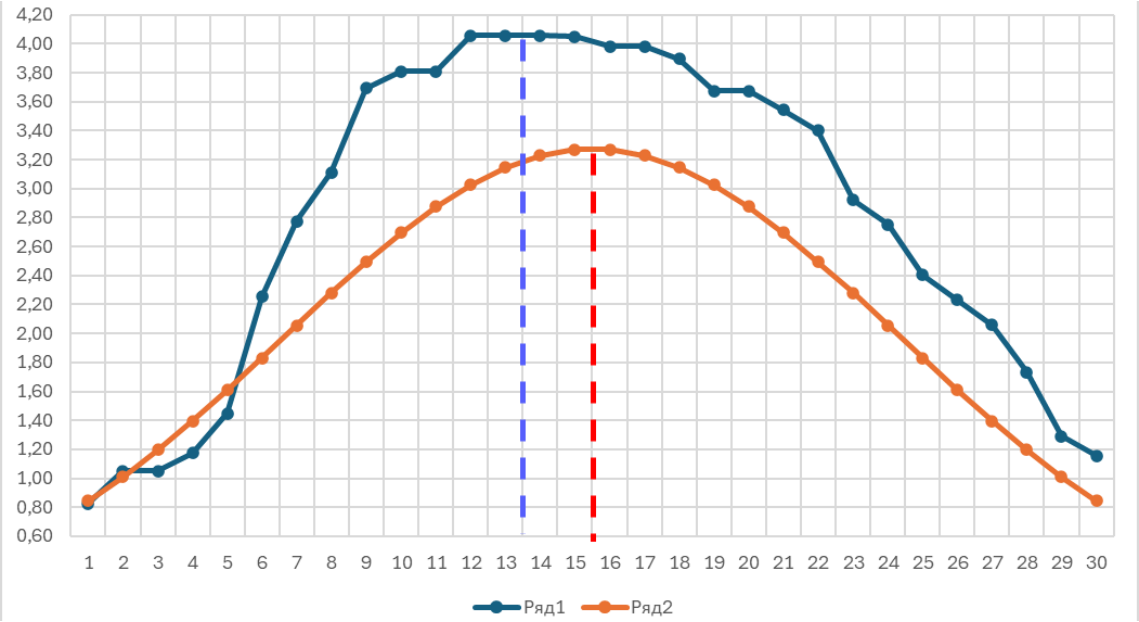


Рисунок 3. Сравнение данных фактической выборки и идеального графика выборки ЗНР

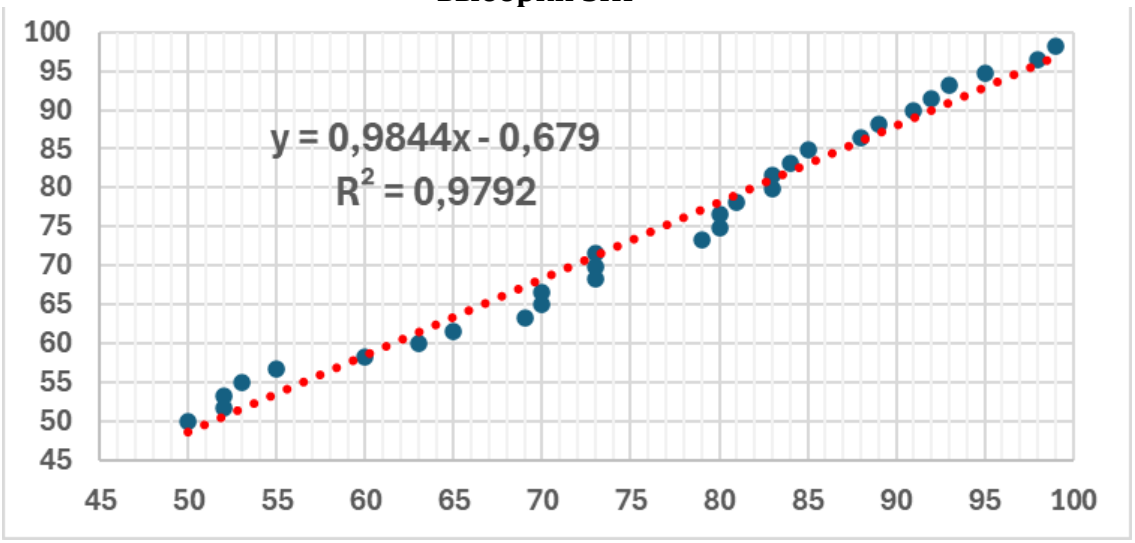


Рисунок 4. Точечная диаграмма фактической и идеальной выборок данных с линией тренда

Заключение

В настоящей статье разработан и обоснован комплексный методический подход к расчёту, контролю и анализу складских запасов, объединяющий семь взаимосвязанных аналитических инструментов. Предложенная методология позволяет перейти от оценки единичных показателей к системному многоаспектному анализу динамики запасов, обеспечивая объективную информационную основу для принятия управленческих решений. Совмещённая матрица ABC–XYZ визуализирует распределение ассортимента по стратегической значимости и предсказуемости спроса, наглядно выявляя как зоны максимальной эффективности (ячейка AX), так и незадействованные резервы развития

[8,14]. Коэффициент осцилляции служит оперативным индикатором нестабильности запасов и позволяет своевременно диагностировать эффект «хлыста» в цепи поставок [10,11]. Анализ коэффициентов асимметрии и эксцесса обеспечивает проверку соответствия данных нормальному закону распределения, что критически важно для корректного планирования страхового запаса. Все расчётные модели реализованы на базе Microsoft Excel без специализированного программного обеспечения [13], что делает методику доступной для предприятий любого масштаба.

Для количественной оценки эффективности предложенной методики выполнено сопоставление двух сценариев расчёта страхового запаса на случай всплесков спроса (формула 2): базового, при котором для всех 18 ассортиментных позиций применяется единый коэффициент вариации, равный среднему по выборке значению (CVср = 10,9 %), и предложенного, при котором коэффициент вариации CVi принимается индивидуально по каждой позиции в соответствии с результатами XYZ-анализа (табл. 5).

Таблица 5. Оценка экономического эффекта дифференцированного расчёта страхового запаса по методике XYZ-анализа

АГ	Qi, т	CV, %	Psr, т/нед.	Uszvsp (баз.), т	Uszvsp (предл.), т	Δ, т	Δ, %
1	1093	4.9	91.08	9.90	4.46	+5.43	+54.9
2	957	8.2	79.75	8.67	6.54	+2.13	+24.5
3	826	6.7	68.83	7.48	4.61	+2.87	+38.3
4	609	7.8	50.75	5.51	3.96	+1.56	+28.2
5	500	6.4	41.67	4.53	2.67	+1.86	+41.1
6	114	9.1	9.50	1.03	0.86	+0.17	+16.3
7	108	9.3	9.00	0.98	0.84	+0.14	+14.4
8	107	12.4	8.92	0.97	1.11	-0.14	-14.1
9	103	12.2	8.58	0.93	1.05	-0.11	-12.3
10	95	30.0	7.92	0.86	2.38	-1.51	-176.1
11	92	6.7	7.67	0.83	0.51	+0.32	+38.3
12	90	11.9	7.50	0.82	0.89	-0.08	-9.5
13	85	3.5	7.08	0.77	0.25	+0.52	+67.8
14	79	8.6	6.58	0.72	0.57	+0.15	+20.9
15	79	2.5	6.58	0.72	0.16	+0.55	+77.0
16	73	16.7	6.08	0.66	1.02	-0.35	-53.7

АГ	Qi, т	CV, %	Psr, т/нед.	Uszvsp (баз.), т	Uszvsp (предл.), т	Δ, т	Δ, %
17	69	25.6	5.75	0.62	1.47	-0.85	-135.6
18	68	13.1	5.67	0.62	0.74	-0.13	-20.6
Итого	5147	—	—	46.61	34.08	−12.52	−26.9

Примечание: расчёт выполнен по формуле (2) при Psr = Qi/12 (период наблюдения — 12 недель), Uszvsp(баз.) — при едином для всей выборки коэффициенте вариации CVcp = 10,9 %, применяемом без учёта XYZ-дифференциации; Uszvsp (предл.) — при фактическом CV позиции согласно таблице 2.

Расчёт показал, что суммарная величина страхового запаса по всей номенклатуре снижается с 46,6 до 34,1 т, то есть на 12,5 т, или на 26,9 %. Снижение достигается за счёт позиций категории X (1–7, 11, 13–15), для которых единый коэффициент вариации существенно завышал требуемый буфер относительно их фактической стабильности спроса. Одновременно для позиций категории Z (10, 17) и части категории Y (8, 9, 12, 16, 18) страховой запас, напротив, увеличивается — на 176,1; 135,6; 14,1; 12,3; 9,5 и 20,6 % соответственно, — что отражает их повышенную нестабильность и компенсирует риск дефицита, ранее недооценённый при усреднённом подходе.

Таким образом, дифференцированный расчёт страхового запаса по методике XYZ-анализа не просто перераспределяет, а сокращает совокупный объём запасов, одновременно повышая обоснованность его распределения между позициями: снижение нагрузки на стабильные позиции категории X превышает прирост, необходимый для защиты нестабильных позиций категории Z и части Y. Полученное сокращение среднего запаса Zsr прямо пропорционально снижает затраты на связанный капитал Ksvz (формула 12) и повышает скорость товарооборота Vtvoi (формула 5) при неизменном объёме товарооборота Oi. Необходимо учесть, что для позиций, по которым страховой запас снижается (категория X), полученный эффект должен подтверждаться сохранением уровня готовности к поставке Gpost (формулы 8–10) на прежнем уровне. В противном случае экономия на запасах будет достигнута за счёт роста риска дефицита, что не совсем соответствует целям предложенной методики.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка автоматизированной системы поддержки решений [4,12,17], интегрирующей предложенные инструменты в единую цифровую платформу управления запасами с функцией автоматического формирования рекомендаций.

Вклад авторов:

Кабикенов С.Ж. – внёс существенный вклад в разработку концепции и методологии исследования, определение целей и задач работы; осуществлял научное руководство исследованием; принимал участие в анализе и интерпретации полученных результатов; выполнил критический пересмотр содержания статьи и утвердил окончательный вариант рукописи для публикации.

Шалаев В.В. – осуществлял сбор, систематизацию и обработку исходных данных; выполнял расчёты показателей управления складскими запасами; участвовал в разработке аналитических материалов и подготовке графических и табличных данных; принимал

участие в написании основных разделов статьи и согласовал окончательную версию рукописи.

Киселёва Г.В. – проводила анализ эффективности методов управления складскими запасами; выполняла оценку результатов исследования и их практической значимости; участвовала в подготовке обзора литературы и оформлении статьи в соответствии с требованиями издания; утвердила окончательный вариант статьи и согласилась нести ответственность за достоверность представленных данных и научную корректность исследования.

Кутьенко С.Ю. – принимал участие в разработке математической модели анализа складских запасов; осуществлял программную реализацию расчётных алгоритмов в среде Microsoft Excel; выполнял проверку корректности вычислений и визуализацию результатов исследования; участвовал в подготовке разделов статьи, посвящённых статистическому анализу данных; согласовал окончательный вариант рукописи и принял ответственность за достоверность представленных расчётов.

Список литературы

1. Waters D. Inventory Control and Management (2nd edition, ISBN 978-0470514139). John Wiley & Sons: Chichester, United Kingdom, 2009; Vol. 1, pp. 75–184.
2. Silver E.A., Pyke D.F., Thomas D.J. Inventory and Production Management in Supply Chains (4th edition, ISBN 978-1439806111). CRC Press: Boca Raton, USA, 2016; Vol. 1, pp. 89–267.
3. Christopher M. Logistics and Supply Chain Management (5th edition, ISBN 978-1292083797). Pearson Education: Harlow, United Kingdom, 2016; Vol. 1, pp. 154–196.
4. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation (7th edition, ISBN 978-0134731889). Pearson: New York, USA, 2019; Vol. 1, pp. 312–428.
5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика (12-е изд., ISBN 978-5-9916-9810-6). Юрайт: Москва, Россия, 2023; Т. 1, с. 215–387.
6. Елисеева И.И., Юзбашев М.М. Общая теория статистики (5-е изд., ISBN 978-5-534-18798-6). Юрайт: Москва, Россия, 2024; Т. 1, с. 186–352.
7. Сергеев В.И. Логистика и управление цепями поставок (ISBN 978-5-534-15752-1). Юрайт: Москва, Россия, 2023; Т. 1, с. 201–364.
8. Лукинский В.С., Лукинский В.В., Плетнева Н.Г. Логистика и управление цепями поставок (ISBN 978-5-534-11323-7). Юрайт: Москва, Россия, 2022; Т. 1, с. 145–286.
9. 9 Heizer J., Render B., Munson C. Operations Management: Processes and Supply Chains (13th edition, ISBN 978-0134741062). Pearson Education: Boston, USA, 2020; Vol. 1, pp. 512–545.
10. Lee H.L., Padmanabhan V., Whang S. Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. Management Science. Vol. 43, No. 4, USA, 1997. pp. 546–558.
11. Lee H.L., Padmanabhan V., Whang S. The Bullwhip Effect in Supply Chains. Sloan Management Review. Vol. 38, No. 3, USA, 1997. pp. 93–102.
12. Richards G. Warehouse Management: A Complete Guide to Improving Efficiency and Minimizing Costs in the Modern Warehouse (4th edition, ISBN 978-1398602045). Kogan Page: London, United Kingdom, 2022; Vol. 1, pp. 201–384.
13. Microsoft Excel Documentation. Доступно онлайн: https://support.microsoft.com/excel
14. ABC Supply Chain. ABC XYZ Analysis in Inventory Management. Доступно онлайн: https://abcsupplychain.com/abc-xyz-analysis/

15. AnyLogistix. Safety Stock Estimation in Supply Chain Management. Доступно онлайн: https://www.anylogistix.com/safety-stock-in-supply-chain-management/
16. Demiray Kırmızı S., Ceylan Z., Bulkan S. Enhancing Inventory Management through Safety-Stock Strategies — A Case Study. Systems, Vol. 12, No. 7, 260. MDPI: Basel, Switzerland, 2024. https://doi.org/10.3390/systems12070260
17. Fan L., Song Z., Mao W. et al. Change Is Safer: A Dynamic Safety Stock Model for Inventory Management of Large Manufacturing Enterprise Based on Intermittent Time Series Forecasting. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 36, pp. 3983–4003. Springer: Cham, Switzerland, 2025. https://doi.org/10.1007/s10845-024-02442-y
18. Niekurzak M., Mikulik J. Inventory Segmentation and Demand Forecasting as Tools Supporting Sustainable Resource Management in a Manufacturing Company. Sustainability, Vol. 18, No. 8, 4047. MDPI: Basel, Switzerland, 2026. https://doi.org/10.3390/su18084047

S.Zh. Kabikenov*, V.V. Shalaev, G.V. Kiseleva, S.Yu. Kutyenko

Non-profit Joint Stock Company "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", Karaganda, Kazakhstan

Calculation, Control and Analysis in Warehouse Inventory Management

Abstract. The article examines the possibilities of using Excel spreadsheets for monitoring, analyzing, and managing warehouse inventories in logistics systems. The purpose of the study is to develop and substantiate practical approaches to assessing inventory management efficiency based on Excel tools and modern logistics analysis methods. The main areas of research include calculating optimal and average inventory levels, evaluating inventory turnover, analyzing the level of delivery service, and applying ABC and XYZ analysis for the classification of product groups. The scientific significance of the study lies in the integrated application of statistical and logistics methods aimed at improving the quality of managerial decision-making. The research methodology is based on economic and mathematical methods, statistical analysis, and the use of variation, oscillation, skewness, and kurtosis coefficients, followed by visualization of the results using Excel tools. As a result, a universal inventory analysis model was developed, making it possible to identify demand instability, assess the risks of shortages and excess inventories, and optimize replenishment processes. The practical significance of the study lies in the possibility of applying the proposed model to improve warehouse logistics efficiency, reduce costs, and enhance the quality of material flow management.

Keywords: warehouse inventory, Excel spreadsheets, ABC analysis, XYZ analysis, inventory turnover, coefficient of variation, oscillation coefficient.

References

1. Waters D. Inventory Control and Management (2nd edition, ISBN 978-0470514139). John Wiley & Sons: Chichester, United Kingdom, 2009; Vol. 1, pp. 75–184.
2. Silver E.A., Pyke D.F., Thomas D.J. Inventory and Production Management in Supply Chains (4th edition, ISBN 978-1439806111). CRC Press: Boca Raton, USA, 2016; Vol. 1, pp. 89–267.
3. Christopher M. Logistics and Supply Chain Management (5th edition, ISBN 978-1292083797). Pearson Education: Harlow, United Kingdom, 2016; Vol. 1, pp. 154–196.

4. Chopra S., Meindl P. Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation (7th edition, ISBN 978-0134731889). Pearson: New York, USA, 2019; Vol. 1, pp. 312–428.
5. Gmurman V.E. Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika (12th ed., ISBN 978-5-9916-9810-6). Yurait: Moscow, Russia, 2023; Vol. 1, pp. 215–387. [in Russian]
6. Eliseeva I.I., Yuzbashev M.M. Obshchaya teoriya statistiki (5th ed., ISBN 978-5-534-18798-6). Yurait: Moscow, Russia, 2024; Vol. 1, pp. 186–352. [in Russian]
7. Sergeev V.I. Logistika i upravlenie tsepyami postavok (ISBN 978-5-534-15752-1). Yurait: Moscow, Russia, 2023; Vol. 1, pp. 201–364. [in Russian]
8. Lukinskiy V.S., Lukinskiy V.V., Pletneva N.G. Logistika i upravlenie tsepyami postavok (ISBN 978-5-534-11323-7). Yurait: Moscow, Russia, 2022; Vol. 1, pp. 145–286. [in Russian]
9. Heizer J., Render B., Munson C. Operations Management: Processes and Supply Chains (13th edition, ISBN 978-0134741062). Pearson Education: Boston, USA, 2020; Vol. 1, pp. 512–545.
10. Lee H.L., Padmanabhan V., Whang S. Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. Management Science. Vol. 43, No. 4, USA, 1997. pp. 546–558.
11. Lee H.L., Padmanabhan V., Whang S. The Bullwhip Effect in Supply Chains. Sloan Management Review. Vol. 38, No. 3, USA, 1997. pp. 93–102.
12. Richards G. Warehouse Management: A Complete Guide to Improving Efficiency and Minimizing Costs in the Modern Warehouse (4th edition, ISBN 978-1398602045). Kogan Page: London, United Kingdom, 2022; Vol. 1, pp. 201–384.
13. Microsoft Excel Documentation. Доступно онлайн: https://support.microsoft.com/excel
14. ABC Supply Chain. ABC XYZ Analysis in Inventory Management. Доступно онлайн: https://abcsupplychain.com/abc-xyz-analysis/
15. AnyLogistix. Safety Stock Estimation in Supply Chain Management. Доступно онлайн: https://www.anylogistix.com/safety-stock-in-supply-chain-management/
16. Demiray Kırmızı, S.; Ceylan, Z.; Bulkan, S. Enhancing Inventory Management through Safety-Stock Strategies — A Case Study. Systems 2024, 12, 260. https://doi.org/10.3390/systems12070260
17. Fan, L.; Song, Z.; Mao, W. et al. Change Is Safer: A Dynamic Safety Stock Model for Inventory Management of Large Manufacturing Enterprise Based on Intermittent Time Series Forecasting. Journal of Intelligent Manufacturing 2025, 36, 3983–4003. https://doi.org/10.1007/s10845-024-02442-y
18. Niekurzak, M.; Mikulik, J. Inventory Segmentation and Demand Forecasting as Tools Supporting Sustainable Resource Management in a Manufacturing Company. Sustainability 2026, 18, 4047. https://doi.org/10.3390/su18084047

Сведения об авторах:

Кабикенов Сапар Жомартович – автор для корреспонденции, кандидат технических наук, профессор НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», пр. Н. Назарбаева, 53а

Шалаев Владимир Васильевич – старший преподаватель НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», мкрн. Степной-2, 6-72, 100024, Караганда, Казахстан

Киселёва Галина Владимировна – магистр технических наук, старший преподаватель НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», мкрн. Восток-2, 10-117, 100029, Караганда, Казахстан
Кутьенко Сергей Юрьевич – магистр экономических наук, старший преподаватель НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», ул. Керамическая, 82а-24, 100022, Караганда, Казахстан

Kabikenov Sapar Zhomartovich – corresponding Author, Candidate of Technical Sciences, Professor, Non-profit Joint Stock Company "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", 53/1-41 N. Nazarbayev Avenue, 100017, Karaganda, Kazakhstan
Shalaev Vladimir Vasilyevich – Senior Lecturer, Non-profit Joint Stock Company "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", Stepnoy-2 Microdistrict, 6-72, 100024, Karaganda, Kazakhstan
Kiseleva Galina Vladimirovna – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer, Non-profit Joint Stock Company "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", Vostok-2 Microdistrict, 10-117, 100029, Karaganda, Kazakhstan
Kutyenko Sergey Yuryevich – Master of Economic Sciences, Senior Lecturer, Non-profit Joint Stock Company "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", Keramicheskaya Street, 82a-24, 100022, Қарағанды, Қазақстан

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Научная статья https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-139-148

Теоретическое обоснование расчетной модели защитного каркаса бронетанкового вооружения и техники от беспилотного летательного аппарата

А.К. Тогусов[1]* , Т.А. Курмангажинов[2] , Е.С. Сеитов[3] , М.Д. Алимжанов[4] , А.Б. Калиев[4]

[1]Департамент военного образования и науки, Министерство обороны Республики Казахстан, Астана, Казахстан
[2]АО «НК«Қазақстан Ғарыш сапары», Астана, Казахстан
[3]Национальный университет обороны Республики Казахстан, Астана, Казахстан
[4]Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

E mail: [1]tak_70@mail.ru., [2]Timas_1993@mail.ru, [3]Seitovyerkin@qmail.com, [4]murat2151@mail.ru, [4]adilbekk@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается проблема повышения защищенности бронетанкового вооружения от поражающих средств, применяемых с использованием беспилотных летательных аппаратов. Проанализированы современные подходы к пассивной защите верхней проекции боевых машин, основанные на применении каркасных, решетчатых и экранных конструкций. Показано, что данные средства позволяют частично компенсировать уязвимость крыши корпуса и башни, которая в условиях современных вооруженных конфликтов является одной из наиболее вероятных зон поражения. Особое внимание уделено разработке и обоснованию расчетной модели защитного каркаса, предназначенного для снижения эффективности боеприпасов, доставляемых беспилотными летательными аппаратами. Представлена конструктивная схема предлагаемого устройства, получившая патентную защиту, и выполнен ее теоретический анализ с использованием положений сопротивления материалов. Проведено исследование напряженно-деформированного состояния основных элементов каркаса при воздействии сосредоточенных и распределенных нагрузок, что позволило определить допустимые параметры прочности и жесткости конструкции.

Ключевые слова: конструкция, каркас, решетчатые экраны, модель, рабица, элемент.

Received 25.02.2026. Revised 26.05.2026. Accepted 28.08.2026. Available online 30.09.2026

* the correspondence author

Введение

Актуальность темы данной статьи обусловлена резким ростом угроз со стороны беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в современных вооружённых конфликтах и их высокой эффективностью при поражении бронетанкового вооружения (БТВ), прежде всего при ударах по верхней проекции. Практика боевого применения показывает, что традиционные средства защиты БТВ не обеспечивают надежного противодействия малогабаритным БПЛА и сбрасываемым ими боеприпасам, что приводит к значительным потерям техники. В этих условиях особое значение приобретают пассивные механические средства защиты, отличающиеся простотой конструкции, ремонтопригодностью и возможностью оперативного внедрения в войсках.

В настоящее время для защиты БТВ от БПЛА применяются различные типы таких устройств, характеризующиеся значительным конструктивным разнообразием. Наиболее широкое распространение получили пассивные механические защитные конструкции каркасного, зонтичного, козырькового и решетчато-бронированного типов, экраны которых выполняются в виде сетчатых, цепных и комбинированных элементов [1–2]. Примеры указанных конструктивных решений приведены на рисунке 1. Вместе с тем существующие каркасные и сетчатые конструкции во многих случаях разрабатываются эмпирически, без строгого инженерного обоснования их несущей способности и устойчивости к эксплуатационным нагрузкам. Это определяет необходимость создания расчетно обоснованных моделей защитных каркасов и разработки методик их проектирования.

Таким образом, исследование, направленное на теоретическое обоснование расчетной модели защитного каркаса БТВ от воздействия БПЛА, является актуальным как с научной точки зрения, так и с позиций практического повышения живучести бронетехники в условиях современных боевых действий.

Научная новизна работы состоит в формировании расчетно-аналитического подхода к проектированию защитных каркасных конструкций для верхней проекции бронетанковой техники, обеспечивающего количественную оценку их несущей способности и устойчивости при воздействии нагрузок, характерных для поражающих средств БПЛА.

Целью исследования является теоретическое обоснование расчетной модели защитного каркаса и определение рациональных параметров его несущих элементов на основе методов сопротивления материалов.

Методология

Методологической основой исследования является системный подход к анализу средств пассивной защиты БТВ от воздействий БПЛА [3–5]. В работе использованы методы теоретического анализа и синтеза, позволяющие обобщить существующие конструктивные решения защитных каркасных устройств и выявить их основные функциональные особенности.

Для обоснования расчетной модели защитного каркаса применялись методы сопротивления материалов и строительной механики, в частности методы расчета элементов конструкций на сжатие, изгиб и устойчивость. Расчет напряженно-деформированного состояния вертикальных и горизонтальных стержней выполнялся на основе классических зависимостей теории упругости с введением упрощающих допущений, обеспечивающих возможность аналитической оценки прочности и жесткости конструкции [6-9].

Исходные данные для расчетов принимались с учетом характеристик типовых конструкционных материалов и параметров сетчатых защитных экранов, используемых в практике защиты бронетехники. Геометрические характеристики поперечных сечений элементов каркаса определялись по нормативным сортаментам прокатных профилей. Нагрузки моделировались в виде сосредоточенных и равномерно распределенных сил, соответствующих воздействию боеприпасов и элементов конструкции.

Дополнительно использовались методы сравнительного анализа, позволившие сопоставить расчетные результаты с известными техническими решениями и оценить целесообразность применения предложенной модели защитного каркаса. Полученные теоретические результаты рассматриваются как исходная база для последующих численных расчетов и экспериментальной проверки несущей способности конструкции.



Рисунок 1. Механические защитные устройства БТВ от БПЛА

Результаты и Обсуждение

В рамках реализуемого методологического подхода в качестве объекта исследования выбрана конструкция защитного каркаса с сетчатым экраном, предназначенная для противодействия воздействию боеприпасов, сбрасываемых с БПЛА. Выбор данного типа защитного устройства обусловлен его широким практическим применением, простотой конструктивного исполнения и возможностью аналитического описания напряженно-деформированного состояния его элементов. В качестве защитного экрана принят сетчатый материал типа «рабица», механические характеристики которого позволяют рассматривать его как элемент, участвующий в перераспределении внешней нагрузки и снижающий воздействие на несущие элементы каркаса.

Защитный экран в виде полотна сетки «рабица» частично накрывает конструкцию каркасного типа. Сетка «рабица» представляет из себя конструкцию из изогнутых проволок, в соответствии со стандартом ТУ 14-178-287-2003. Размер ячейки равен 5×5 см. Разрывная нагрузка проволоки достигает (290÷540) Н/мм^2. Разрывная нагрузка сетчатого полотна составляет от 8 кН и выше. Вес 1 м^2 полотна равен 1,5 кг, при диаметре прутка 2 мм [2]. Предварительные оценочные расчёты на прочность и выбор защитного экрана в виде сетки «рабица» показали достаточную приемлемость такого решения в подходах создания модели защитного каркаса.

Расчетная схема модели защитного каркаса представлена на рисунке 2. (сетка «рабица» – условно не показана).

Основными несущими элементами защитного устройства каркасного типа являются вертикальные и горизонтальные стержни, поперечные сечения которых имеют различную конфигурацию. Указанные стержни в процессе работы находятся в наиболее

неблагоприятных условиях нагружения и их напряженно-деформированное состояние требует изучения для определения несущей способности конструкции. В этой связи рассмотрим расчетную модель защитного каркаса БТВ от БПЛА. На указанную конструкцию защитного устройства получен патент на полезную модель [10]. Конструкция позволяет вращаться ей с башней, что не создает ограничений повороту пушки. Основным преимуществом устройства является простота конструкции, возможность быстрой сборки и разборки с целью замены поврежденных элементов в боевых условиях.

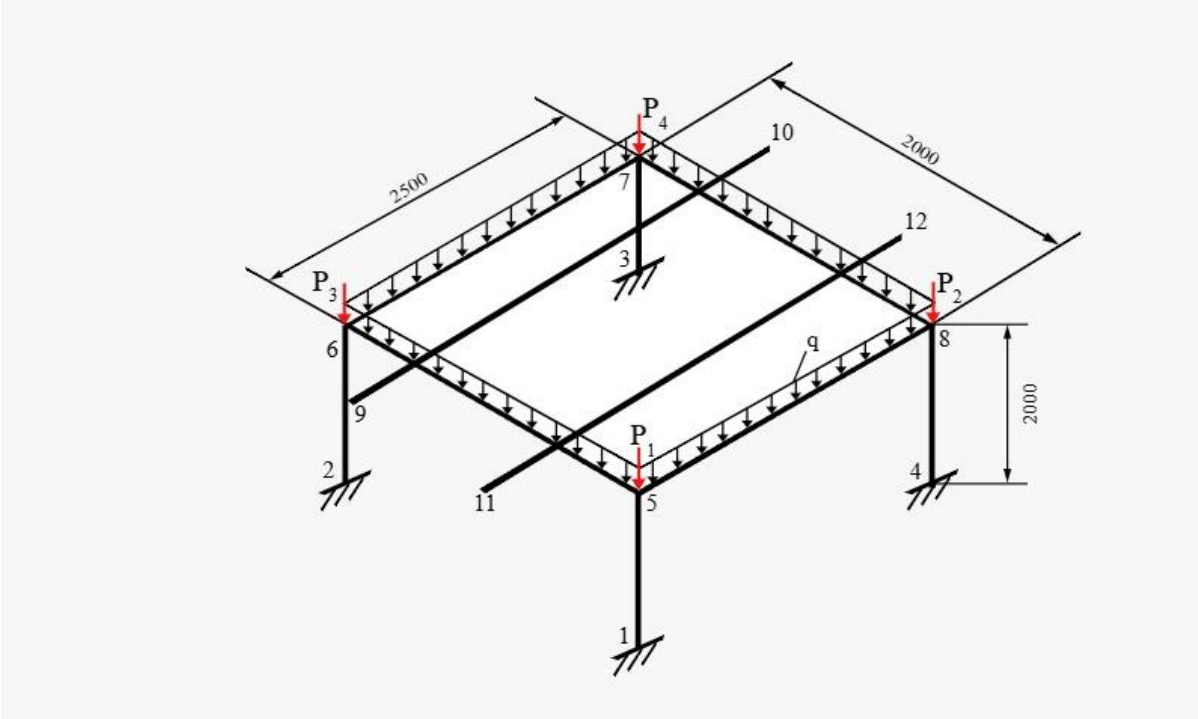


Рисунок 2. Расчетная схема модели защитного каркаса

Предварительный анализ нагрузок элементов конструкции показал, что основное действие внешних нагрузок воспринимаются вертикальными и горизонтальными стержнями. В результате целесообразно рассмотреть напряженно-деформированное состояние вертикальных и горизонтальных стержней отдельно и оценить размеры их поперечных сечений в смысле прочности. Введя упрощающие предположения следует считать, что вертикальные элементы 1–5; 2–6; 3–7; 4–8 нагружены соответственно сосредоточенными силами P_1, P_2, P_3, P_4. Горизонтальные элементы 5–6; 6–7; 7–8; 5–8 нагружены распределенной нагрузкой интенсивностью q.

Начнем с рассмотрения вертикального стержня 1–5, для остальных вертикальных стержней подбор сечений осуществляется аналогично. Расчетная схема сжатого вертикального стержня 1–5 в виде равнобокого уголка 5х5 изображена на рисунке 3.

За исходные данные примем следующие параметры вертикального стержня в виде уголка 8×8. Материал уголка Ст. 3; горячекатанная длина l = 2 м; вертикальная нагрузка составляет

P_1 = 140 кН; допускаемое напряжение [σ] = 160 МПа; модуль упругости материала

$E = 2\times10^4$ кН/см^2.

Определим размеры поперечного сечения вертикального стержня 1–5, критическую силу $P_{кр}$ и коэффициент запаса устойчивости n_y. Предположим, нижний конец стержня 1–5 защемлен, верхний конец шарнирно опёрт, как показано на рисунке 3. Используя табличные данные [11], выпишем геометрические характеристики поперечного сечения: Площадь поперечного сечения A = 10,8 см^2; момент инерции сечения I_x = 65,3 см^4; радиус инерции сечения i_x = 2,45 см^4; гибкость вертикального стержня $\lambda = \mu \cdot L / i_x$, где μ – коэффициент приведенной длины, так как нижний конец стержня защемлен, а верхний шарнирно оперт, то примем μ = 0,7 [11].

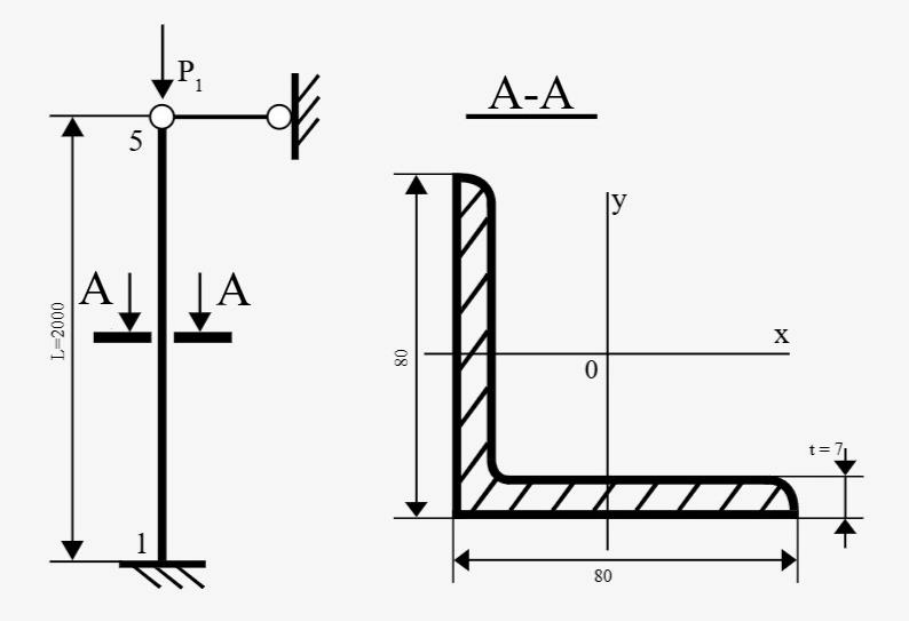


Рисунок 3. Расчетная схема сжатого вертикального стержня 1-5

Используя условие устойчивости, имеем:

$$\sigma = P / A \le [\sigma]\cdot\varphi , \quad (1)$$

где φ – коэффициент продольного изгиба, зависит от гибкости.

$$\text{Найдем } \lambda = \frac{0,7*200}{2,45} = 58.$$

Для данного значения λ, примем φ = 0,805 [11].

Из (1) определим площадь поперечного сечения A стержня:

$$A = \frac{P_1}{\varphi*[\sigma]} \quad (2)$$

$$A = \frac{140}{0,805*16} = 10,8 \text{ см}^2.$$

Оценить допускаемую вертикальную нагрузку можно из условия устойчивости:

$$P_1 = [\sigma]*A*\varphi , \quad (3)$$

$$P_1 = 16*10,8*0,805 = 140 \text{ кН}.$$

Полученное допускаемое значение вертикальной нагрузки следует считать соответствующим условию устойчивости

Критическую нагрузку $P_{кр}$ и коэффициент запаса устойчивости n_y найдем как [11]:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 * E * I_x}{(\mu * l)^2}; \quad (4)$$

$$n_y = \frac{P_{кр}}{P_1}; \quad (5)$$

$$P_{кр} = \frac{3,14 * 2 * 10^4 * 65,3}{(0,7 * 200)^2} = \frac{4100840}{19600} = 210 \text{ кН}$$

$$n_y = \frac{210}{140} = 1,5$$

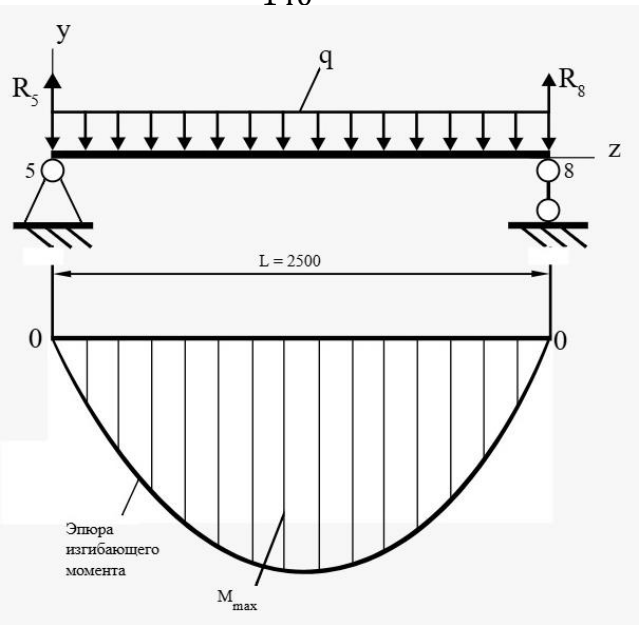


Рисунок 4. Расчетная схема горизонтального стержня 5-8 и эпюра изгибающего момента

Полученные оценочные значения в приближенном виде могут быть использованы, как указывалось выше, в дальнейшем численном методе расчета несущей способности всей конструкции.

Перейдем к рассмотрению расчетной схемы горизонтального стержня 5–8. Полагаем по аналогии с вертикальным стержнем, что расчет остальных горизонтальных стержней, входящих в расчетную схему, нужно вести в том же порядке, как и горизонтального стержня 5–8.

Расчетная схема горизонтального стержня 5–8 и эпюра изгибающего момента приведена на рисунке 4.

Упрощающим предположением является, что горизонтальный стержень 5–8, имеющий поперечное сечение в виде равнобокого уголка (8х8), нагружен сплошной равномерной нагрузкой интенсивностью q и работает на изгиб, как двухопорная балка. Исходными данными к расчету являются равномерно распределенная нагрузка интенсивностью q = 10 кН/м; расчетное сопротивление материала R = 20 Мпа; длина горизонтального стержня 5–8, *l* = 2,5 м. Определим размер поперечного сечения горизонтального стержня 5–8.

Эпюра изгибающего момента (см. рисунок 4) построена по методике механики элементов конструкции, имеет форму параболы и ее наибольшее значение достигает в середине стержня: $M_{max} = \frac{q*l^2}{8}$; R_5, R_8 – реакции (см. рисунок 4). Условие прочности по нормальным напряжениям в середине стержня найдем по [11], как:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_x} \leq R, \text{ или} \quad (6)$$

$$\sigma_{max} = \frac{q*l^2}{8W_x} \leq R. \quad (7)$$

В результате требуемый момент сопротивления сечения должен быть $W_x \approx 5{,}6$ см^3.

Из сортамента находим равнобокий уголок, соответствующий требуемому моменту сопротивления сечения.

Прочность указанного равнобокого уголка будет находиться в пределах, как следует из (7):

$$\sigma_{max} = \frac{q*l^2}{8W_x} \leq R,$$

$$\sigma_{max} = \frac{10^4*2{,}5^2}{8*0{,}056*10^{-4}} \approx 13{,}95 \text{ Мпа} \leq R = 20 \text{ МПа}.$$

Следовательно, поперечное сечение горизонтального стержня 5–8 отвечает условиям прочности по нормальным напряжениям.

Заключение

В статье выполнено теоретическое обоснование расчетной модели защитного каркаса БТВ, предназначенного для снижения эффективности поражения боеприпасами, доставляемыми БПЛА. На основе анализа существующих пассивных механических средств защиты показано, что каркасно-сетчатые конструкции обладают значительным потенциалом для повышения живучести бронетехники за счет простоты конструкции, ремонтопригодности и возможности оперативного внедрения.

Разработана расчетная схема защитного каркаса и проведено исследование напряженно-деформированного состояния его основных несущих элементов при действии сосредоточенных и распределенных нагрузок. Полученные аналитические зависимости позволяют оценивать прочность и устойчивость вертикальных и горизонтальных стержней, а также обосновывать выбор их геометрических параметров. Результаты расчетов подтверждают принципиальную реализуемость предложенной конструкции и возможность ее применения в качестве элемента пассивной защиты верхней проекции БТВ.

Представленные теоретические положения могут быть использованы при проектировании перспективных защитных устройств каркасного типа и служат основой для дальнейших численных и экспериментальных исследований. В целом полученные

результаты вносят вклад в развитие научно обоснованных подходов к созданию средств защиты БТВ от угроз со стороны БПЛА.

Вклад авторов

Тогусов А.К. – сформулировал научную проблему исследования, разработал общую концепцию работы и расчетную модель защитного каркаса, выполнил теоретическое обоснование и участвовал в интерпретации полученных результатов.

Сеитов Е.С. – осуществил анализ существующих конструктивных решений средств пассивной защиты бронетанковой техники, принял участие в формировании методологии исследования и подготовке обзорной части статьи.

Алимжанов М.Д. – выполнил расчеты напряженно-деформированного состояния элементов конструкции, участвовал в обработке и анализе результатов, а также в подготовке графических материалов и схем.

Калиев А.Б. – принимал участие в разработке расчетной схемы конструкции, уточнении исходных данных для моделирования и в редактировании текста статьи.

Курмангажинов Т.А. – участвовал в формировании выводов исследования, подготовке заключительной части статьи и обеспечивал научное редактирование рукописи.

Благодарность, конфликт интересов

Статья опубликована в рамках выполнения научного проекта грантового финансирования на 2025□2027 годы, ИРН AR261059/024 «Обоснование конструктивных параметров устройства для защиты бронетанкового вооружения от ударов беспилотных летательных аппаратов и разработка на этой основе тактико-технического задания на его создание» (Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан).

Список литературы

1. Патент RU 2830735C1, Российская Федерация. Устройство для защиты бронетанкового вооружения от беспилотных летательных аппаратов. – Опубл.2014
2. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. – СПб.: Наукоёмкие технологии, 2020. – 204 с.
3. Borvik T., Hopperstad O.S., Berstad T., Langseth M. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration // European Journal of Mechanics A/Solids. – 2001. – Vol. 20. – P. 685–712.
4. Nurick G.N., Shave G.C. The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads // International Journal of Mechanical Sciences. – 1996. – Vol. 38. – P. 99–116.
5. Almohandes A.A., Abdel-Khalik S.I. Ballistic resistance of steel plates // International Journal of Impact Engineering. – 2005. – Vol. 31. – P. 103–117.
6. Hazell P.J. Armour: Materials, Theory, and Design. – CRC Press, 2015.
7. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. – Wiley, 2002.
8. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов. – СПб.: Лань, 2002 – 672 с.
9. Hibbeler R.C. Mechanics of Materials. – Pearson, 2017.

10.Патент KZ 11689, Республика Казахстан. Устройство для защиты бронетанкового вооружения и техники от беспилотных летательных аппаратов / Тогусов А.К., Курмангажинов Т.А., Сеитов Е.С. и др. – Опубл. 23.01.2026.

11. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1989.- 512с.

A.K. Togusov[1]*, T.A. Kurmangazhinov[2], E.S. Seitov[3], M.D. Alimzhanov[4], A.B. Kaliyev[4]

[1] Department of Military Education and Science, Ministry of Defense of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan
[2] JSC "NC Kazakhstan Gharysh Sapary", Astana, Kazakhstan
[3] National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Astana, Kazakhstan
[4] L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Theoretical justification of a computational model of a protective frame for armored vehicles against unmanned aerial vehicles

Abstract. The paper addresses the problem of improving the protection of armored fighting vehicles against destructive means delivered by unmanned aerial vehicles. Modern approaches to the passive protection of the upper projection of combat vehicles based on the use of frame-type, lattice, and screen structures are analyzed. It is shown that these means make it possible to partially compensate for the vulnerability of the hull roof and turret, which, under the conditions of modern armed conflicts, represent one of the most probable impact zones. Special attention is paid to the development and substantiation of a computational model of a protective frame designed to reduce the effectiveness of munitions delivered by unmanned aerial vehicles. The structural scheme of the proposed device, which has received patent protection, is presented, and its theoretical analysis is carried out using the principles of the strength of materials. A study of the stress-strain state of the main frame elements under concentrated and distributed loads is performed, which makes it possible to determine the permissible strength and stiffness parameters of the structure.The obtained results can be used in the design of advanced passive protection systems for armored vehicles and in the development of integrated countermeasure systems against threats posed by unmanned aerial vehicles.

Keywords: Structure, frame, slat screens, model, chain-link mesh, element.

References

1. Patent RU 2830735C1, Russian Federation. Device for protection of armored vehicles from unmanned aerial vehicles. Published 2014 (in Russian).
2. Makarenko S.I. Countering unmanned aerial vehicles: monograph. Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2020. 204 p. (in Russian).
3. Borvik T., Hopperstad O.S., Berstad T., Langseth M. A computational model of viscoplasticity and ductile damage for impact and penetration // European Journal of Mechanics A/Solids. – 2001. – Vol. 20. – P. 685–712.
4. Nurick G.N., Shave G.C. The deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads // International Journal of Mechanical Sciences. – 1996. – Vol. 38. – P. 99–116.

5. Almohandes A.A., Abdel-Khalik S.I. Ballistic resistance of steel plates // International Journal of Impact Engineering. – 2005. – Vol. 31. – P. 103–117.
6. Hazell P.J. Armour: Materials, Theory, and Design. – CRC Press, 2015.
7. Cook R.D., Malkus D.S., Plesha M.E., Witt R.J. Concepts and Applications of Finite Element Analysis. – Wiley, 2002.
8. S.Timoshenko, J.Gere. Mechanics of Materials. – Saint-Petersburg: Lan. – 2002. – 672 p. (in Russian)
9. Hibbeler R.C. Mechanics of Materials. – Pearson, 2017.
10. Patent KZ 11689, Republic of Kazakhstan. Device for protection of armored vehicles and military equipment from unmanned aerial vehicles / Togusov A.K., Kurmangazhinov T.A., Seitov E.S. et al. Published 23.01.2026 (in Russian).
11. Darkov A.V., Shpiro G.S. Strength of materials. Moscow: Vysshaya shkola, 1989. 512 p. (in Russian).

Информация об авторах

Тогусов А.К. – к.т.н., профессор, заместитель начальника Департамента военного образования и науки МО РК, Астана, 010000, Республика Казахстан
Сеитов Е.С. – докторант 2 курса Национального университета обороны Республики Казахстан, Астана, 010017, Республика Казахстан
Курмангажинов Т.А. – инженер Департамента разработки программного обеспечения, Астана, 010017, Республика Казахстан
Алимжанов М.Д. – к.т.н., доцент кафедры механики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, 010012, Республика Казахстан
Калиев А.Б. – к.т.н., заведующий кафедрой механики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, 010012, Республика Казахстан е

Togusov A.K. – Candidate of Technical Sciences, Professor, Colonel, Deputy Head of the Department of Military Education and Science of the Ministry of Defense of the Republic of Kazakhstan, Astana, 010000, Republic of Kazakhstan
Seitov E.S. – 2nd-year doctoral student, National Defense University of the Republic of Kazakhstan, Astana, 010017, Republic of Kazakhstan
Kurmangazhinov T.A. – Engineer, Software Development Department, Astana, 010017, Republic of Kazakhstan
Alimzhanov M.D. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mechanics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan
Kaliyev A.B. – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanics, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, 010012, Republic of Kazakhstan

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Article https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-149-160

Investigation of the dynamics of the vibrating system of a moving vehicle

T.N. Bekenov[1], Z.K. Sattinova[1*], Zh.T. Nussupbek[2,3], Zh.T. Tassybekov[4]

[1]L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
[2]S. Seifullin Kazakh AgroTechnical University, Astana, Kazakhstan
[3]LPP "Industry Development Research Center", Astana, Kazakhstan
[4]LPP «Eurasia Design», Astana, Kazakhstan

E mail: : [1]Bekbken@gmail.com, [1]Sattinova.kz@gmail.com, [2,3]nussupbek.org@gmail.com, [4]Zhandos.org@mail.ru*

Abstract. The paper presents a study of the dynamics of vibrations of the GAZ A31R32 car due to the effects of road bumps. The dynamics of the car's oscillation from the effects of road bumps is an urgent problem, as it has a significant impact on its smoothness, handling, and stability. To study the dynamics of a moving car, a mathematical model has been developed that makes it possible to evaluate the elastic damping properties of a suspension with constant, variable and adjustable parameters. It is a four-bearing, five-mass dynamic model adapted to study roll fluctuations, pitch, and vertical movement of the center of gravity during braking and acceleration. The results of modeling the car's oscillation system show that the elastic-damping properties of the suspension effectively ensure an acceptable level of smoothness during several periods of oscillation, but at the initial moment of time, quite significant amplitudes are observed, which negatively affect the smoothness. This is caused by the impact of road bumps on the car's vibrations and confirms the need to improve the suspension.

Keywords: vibrating system, dynamics, roll, pitch, vehicle body, directional stability, driving safety

Received 16.08.2026. Revised 03.09.2026. Accepted 17.09.2026. Available online 30.09.2026

* the corresponding author

Introduction

The article examines the dynamics of the oscillating system of a GAZ 31R32 car (with an elongated base, single-row cab, rear-wheel drive, 4x2 wheel formula and a gross weight of 3,500 kg) with a given profile of road bumps and design parameters of its chassis.

The aim of the work is to study the dynamics of the oscillatory system of the GAZ 31R32 car (hereinafter referred to as the car) when it is moving, taking into account changes in the stiffness characteristics of the front and rear suspensions depending on the operating conditions of the car, as well as to substantiate a constructive solution – installing a less rigid transverse stabilizer on the rear axle – aimed at improving smoothness on uneven roads in urban conditions. operation.

The smoothness and controllability of a car are directly determined by the characteristics of its suspension; therefore, the study of the dynamics of the oscillatory system under the influence of specified road profiles remains one of the key tasks in the design and improvement of vehicles. The vibrations of the body and the elastic suspension elements that occur when the wheels hit the roughness of the road surface affect not only passenger comfort, but also the stability of the wheels' grip on the road, and therefore traffic safety, especially at high speeds and when cornering.

The mathematical model of the dynamics of an oscillatory system is described by a system of second-order differential equations that take into account the inertial and elastic forces acting on the body and wheels when driving over rough roads. The model allows us to study the reaction to vibration effects of a suspension with constant, variable and adjustable parameters. In addition, the model takes into account the influence of unsprung masses and tire elasticity on the stability and handling of the car.

The calculations of the dynamics of the oscillating system have shown that the suspension of the design car in steady state effectively suppresses body vibrations; the amplitude of vibrations of the sprung mass decreases to values that ensure an acceptable level of smoothness after several periods of oscillation. A comparative analysis of the oscillation dynamics calculations has shown that the suspension design provides the most optimal vibration-damping mode, in which the stiffness of the main and additional elastic elements is the same.

In addition, the installation of a rear stabilizer of the required rigidity in the general elastic damping suspension system changes the total angular stiffness of the rear axle, which allows for a more even distribution of vibration damping work between the main elastic elements and the additional stabilizing element. This helps to reduce the amplitude of vibrations at the initial stage after hitting the uneven road surfaces.

The methodology

Analysis of the GAZ 31R32 car vibrating system

It is known that a car interacts with the road through the wheel system [1-7], and with the wheels through the suspension system [8-12]. To study the oscillatory system, including the sprung and unsprung masses of the vehicle, an equivalent suspension design was developed. The front suspension is an independent double-wishbone, while the rear suspension of this vehicle is dependent and uses leaf springs. The suspension system has three main components: wheels and the body. A complete design diagram of the oscillating masses is provided, which directly affect controllability and stability (Fig.1).

The front suspension (independent double wishbone) and rear suspension (dependent leaf spring) are shown separately in the diagram. This diagram serves as the basis for developing a model that includes differential equations for the oscillations of the vehicle's sprung and unsprung

masses and an analysis of the impact of suspension parameters on ride quality, handling, and stability.

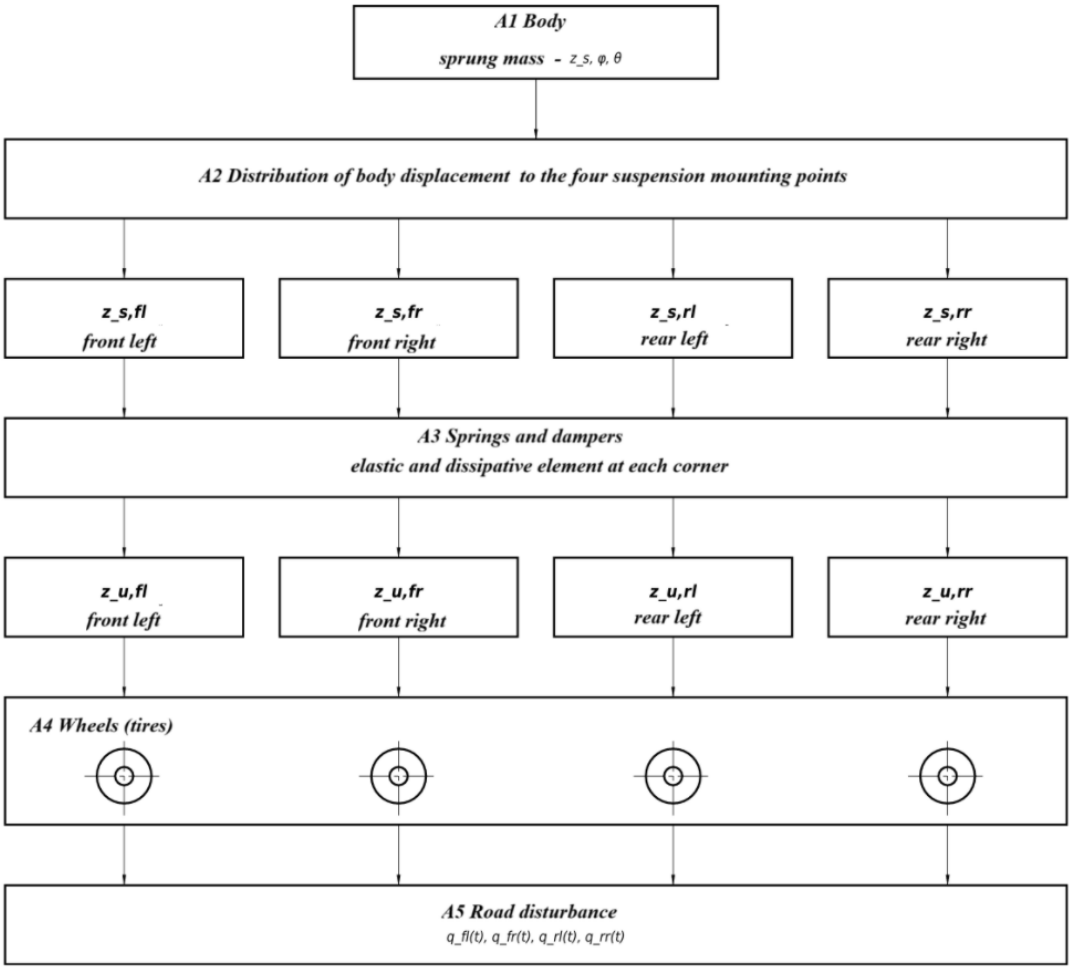


Figure 1. Vibrating system of the GAZ A31R32 (4x2) vehicle

The rigidity characteristics of the tires and body suspension determine the driving performance of the car (Table 1-2).

Table 1. Vehicle component characteristics

Characteristic	Front	Rear
Type	Independent	Dependent: both wheels on the same beam
Suspension scheme	Two levers: upper and lower	On the springs
Elastic element	Spring + shock absorber	Leaf spring
Wheel kinematics	Independent running of each wheel	A joint move
Appointment	manageability	High load capacity

Mathematical model of a gas-filled hydraulic shock absorber. The shock absorber creates a force proportional to the speed of the relative movement between the two nodes:

$$F_{dam} = c \cdot (x_{p1} - x_{p2})$$

c – damping coefficient.

Table 2. Initial parameters of the GAZ31R32 vehicle

Name	Expression	Description
$m_{vehicle\ body}, kg$	990	Mass of vehicle body
m_{GN}, kg	3500	Gross weight GAZ A31R32
$m_{kerb\ weight}, kg$	2510	Curb weight
$I_{roll}, kg \cdot m^2$	378	Interia around roll axis (X)
$I_{pitch}, kg \cdot m^2$	3170	Interia around pitch axis (Y)
m_{wheel}, kg	45	Mass of one wheel with tyre
m_p, kg	80	Mass of driver
$k_{wheel}, N/m$	320000	Tyre radial stiffness
$k_{seat}, N/m$	2200	Seat spring stiffness
$k_{sus\_f}, N/m$	42000	Front suspension spring stiffness
$c_{sus\_f}, N \cdot s/m$	3500	Front suspension damper viscosity
$k_{sus\ r}, N/m$	65000	Rear suspension spring stiffness
$c_{sus\_r}, N \cdot s/m$	5000	Rear suspension damper viscosity
$c_{seat}, N \cdot s/m$	700	Seat damper viscosity
r_{wb}, m	3.745	Wheelbase (distance between front and rear axles) –
r_{ftw}, m	1.75	Front track width (centre)
r_{rtw}, m	1.56	Rear track width (centre)
hb, m	0.04	Bump height
wb, m	0.075	Bump width
$v_{veh}, m/s$	11.11	Vehicle speed
tb, s	wb/v_{veh}	travel time
td, s	r_{wb}/v_{veh}	rear wheel delay

Model of the GAZ A31R32 car vibrating system

To solve the problem of dynamics simulating the state of the oscillatory system during braking and acceleration of the car, its dynamic model was developed. The four-bearing, five-mass dynamic model is adapted to study the roll, pitch, and vertical displacement of the center of gravity of the GAZ 31R32 design vehicle during braking and acceleration. At the same time, we consider the car as an oscillatory system consisting of several masses interconnected by elastic damping connections. For a four-foot, five-mass model, the car body is considered as one large springing mass (m_s), which has vertical movement. Each of the four wheels is modeled as a separate unsprung mass $(m_{ufl}, m_{ufr},\ m_{u\,rl},\ m_{u\,rr})$ with its own vertical movements. This model has 7 degrees of freedom: z_s-vertical movement of the body, $\phi - (roll)$ body roll, $\theta - (pitch)$ body pitch, $z_{u\,fl}, z_{u\,fr}, z_{u\,rl}, z_{u\,rr}$ – vertical movement of the wheels of the front left and right, rear left and right wheels, respectively.

The mathematical model of the system dynamics is written as follows [6-10]:

The equations of dynamics of wheel oscillation*:*

Front left wheel:

$$m_{wh,fl}\ddot{z}_{u,fl} = k_{susfl}\left(z_{s,fl} - z_{u,fl}\right) + c_{susfl}\left(\dot{z}_{s,fl} - \dot{z}_{u,fl}\right) - k_{t\,fl}\left(z_{u,fl} - z_{0,fl}\right) \quad (1)$$

Front right wheel

$$m_{wh,fr}\ddot{z}_{u,fr} = k_{susfr}\left(z_{s,fr} - z_{u,fr}\right) + c_{susfr}\left(\dot{z}_{s,fr} - \dot{z}_{u,fr}\right) - k_{t\,fr}\left(z_{u,fr} - z_{0,fr}\right) \quad (2)$$

Rear left wheel

$$m_{wh,rl}\ddot{z}_{u,rl} = k_{susrl}\left(z_{s,rl} - z_{u,rl}\right) + c_{susrl}\left(\dot{z}_{s,rl} - \dot{z}_{u,rl}\right) - k_{t\,rl}\left(z_{u,rl} - z_{0,rl}\right) \quad (3)$$

Rear right wheel

$$m_{wh,rr}\ddot{z}_{u,rr} = k_{susrr}\left(z_{s,rr} - z_{u,rr}\right) + c_{susrr}\left(\dot{z}_{s,rr} - \dot{z}_{u,rr}\right) - k_{t\,rr}\left(z_{u,rr} - z_{0,rr}\right) \quad (4)$$

$m_{wh} \cdot \ddot{z}_u = F$ – force acting on an unsprung mass; m_{wh}– the mass of each wheel clamped between two springs; $k_{t\,fl}$ – front left wheel tire stiffness, $z_{0\,fl}$- road profile, k_{susfl} – stiffness of the suspension spring of the front left wheel, $z_{s,fl}$ – vertical movement of the sprung mass (body) above the wheel, $z_{u\,fl}$ – vertical movement of the unsprung mass of the front left wheel, c_{susfl} – damping coefficient of the front left wheel shock absorber, $\dot{z}_{s\,fl}$ и $\dot{z}_{u\,fl}$ – the vertical velocities of the sprung and unsprung masses, respectively.

When a car is moving from the side of the road, a kinematic effect occurs, determined by the profile of the road. The roughness of the road causes the car to wobble. According to the conditions of the task, the road unevenness affects only the left wheels of the car, while the right wheels move on a flat surface. In this regard, the road profiles for each wheel are set by the following dependencies:

$$z_{0,fl}(t) = \frac{hb}{2} + wb(t), \qquad z_{0,fr}(t) = 0$$

$$z_{0,rl}(t) = \frac{hb}{2} + wb(t), \qquad z_{0,rr}(t) = 0$$

$wb(t)$ – ledge width, hb – height of the projection.

The equation of dynamics of vertical body vibration*:*

$$m_{body}\ddot{z}_s = -(F_{fl} + F_{fr} + F_{rl} + F_{rr}) \quad (5)$$

$$F_{fl} = k_{susfl}\left(z_{s,fl} - z_{u\,fl}\right) + c_{susfl}\left(\dot{z}_{s,fl} - \dot{z}_{u\,fl}\right)$$

$$F_{fr} = k_{susfr}\left(z_{s,fr} - z_{u\,fr}\right) + c_{susfr}\left(\dot{z}_{s,fr} - \dot{z}_{u\,fr}\right)$$

$$F_{rl} = k_{susrl}\left(z_{s,rl} - z_{u\,rl}\right) + c_{susrl}\left(\dot{z}_{s,rl} - \dot{z}_{u\,rl}\right)$$

$$F_{rr} = k_{susrr}\left(z_{s,rr} - z_{u\,rr}\right) + c_{susrr}\left(\dot{z}_{s,rr} - \dot{z}_{u\,rr}\right)$$

$F_{fl},\ F_{fr}, F_{rl}, F_{rr}$ – the forces in the suspensions of the front left, front right, rear left and rear right wheels, respectively, transmitted through the suspension elements (spring and shock absorber) between the body (sprung mass) and the unsprung masses of the corresponding wheels.

The roll dynamics equation*:*

$$I_{Roll}\ddot{\varphi} = -\frac{r_{ftw}}{2}F_{fl} + \frac{r_{ftw}}{2}F_{fr} + \frac{r_{rtw}}{2}F_{rl} + \frac{r_{rtw}}{2}F_{rr} \quad (6)$$

I_{Roll} – moment of inertia relative to the longitudinal axis.

The equation of pitch dynamics*:*

$$I_{pitch}\ddot{\theta} = -a\left(F_{fl} + F_{fr}\right) + b(F_{rl} + F_{rr}) \quad (7)$$

I_{pitch} − moment of inertia relative to the transverse axis, a – distance from the center of mass to the front axle, b − distance from the center of mass to the rear axle.

To calculate the movements of the body at the attachment points of the suspensions in COMSOL Multiphysics version 6.4, establishes kinematic links between the coordinates of the body z_s, φ и θ:

$$z_{s,fl} = z_s + l_f\varphi - a\theta$$
$$z_{s,fr} = z_s - l_f\varphi - a\theta$$
$$z_{s,rl} = z_s + l_r\varphi + b\theta$$
$$z_{s,rr} = z_s - l_r\varphi + b\theta$$

$z_{s,fl}, z_{s,fr}, z_{s,rl}, z_{s,rr}$ − suspension mounting points on the body, z_s – vertical movement of the body's center of mass, φ – roll angle, θ – pitch angle, l_f – half of the front track, l_r − half of the rear track.

The equation of seat swing dynamics

$$m_{p,fl}\ddot{z}_{p,fl} = k_{seat,fl}\left(z_{s,fl} - z_{p,fl}\right) + c_{seat,fl}\left(\dot{z}_{s,fl} - \dot{z}_{p,fl}\right) \quad (8)$$
$$m_{p,fr}\ddot{z}_{p,fr} = k_{seat,fr}\left(z_{s,fr} - z_{p,fr}\right) + c_{seat,fr}\left(\dot{z}_{s,fr} - \dot{z}_{p,fr}\right) \quad (9)$$
$$m_{p,rl}\ddot{z}_{p,rl} = k_{seat,rl}\left(z_{s,rl} - z_{p,rl}\right) + c_{seat,rl}\left(\dot{z}_{s,rl} - \dot{z}_{p,rl}\right) \quad (10)$$
$$m_{p,rr}\ddot{z}_{p,rr} = k_{seat,rr}\left(z_{s,rr} - z_{p,rr}\right) + c_{seat,rr}\left(\dot{z}_{s,rr} - \dot{z}_{p,rr}\right) \quad (11)$$

Findings/Discussion

Road profile: rectangular wave with a height of 4 cm, a width of 7.5 cm, a speed of 40 km/h (11.11 m/s). The left wheels drive on an uneven road, while the right wheels move on a flat surface. The figure shows that the body rotates around the longitudinal axis (Roll), i.e., the left side of the body is raised. A high Roll value means that only the left wheels are traveling on an uneven road; the load is not symmetrical and, accordingly, the body is tilting. Fig.2 shows the dynamics of the car's roll (blue line), tilt (green), and rise (red) due to the roughness of the road under the left wheels. You can see that with a given roughness of the road, the bank angle is much larger than the tilt angle.

Dynamics of the car's roll speed fluctuation (Roll-Lateral rotation), tilt (Pitch-Longitudinal rotation), and lift (Heave-Vertical displacement) are shown in Fig. 3. The velocity graph shows two different frequencies: low and high, corresponding to the natural frequencies for the system components. At the initial moment of time, the suspension is affected by an external influence from the side of the road profile, which causes sudden fluctuations in the body, and maximum speeds are observed. The maximum speed values are reached at a time of 0.09 s; then, due to the action of the damping elements of the suspension, the vibrations attenuate. The largest amplitude is observed in vertical displacement (the red line is vertical displacement). The graph clearly shows that the roll (Lateral rotation or Roll-blue line) shows a sharp decaying oscillation after reaching the peak value, and the vertical velocity of the center of gravity of the body (Vertical displacement or heave -red line) shows an exponentially decaying character. Consequently, the body makes small vertical fluctuations relative to the equilibrium position. Stability is maintained for longitudinal rotation (Pitch – green line).

The results obtained indicate that, in general, the suspension system of the design car suppresses body vibrations quite effectively, but at the initial moment of time the vibrations have

rather high amplitudes, which primarily affect the smoothness of the car. This circumstance arises due to the influence of the car's suspension parameters.

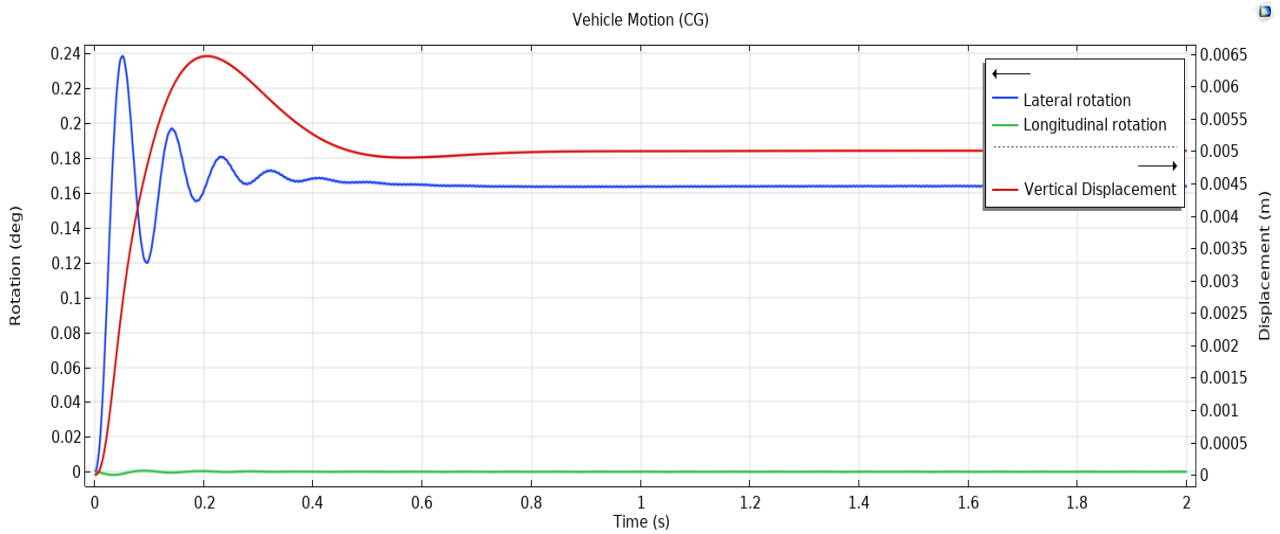


Figure 2. Roll oscillation dynamics (roll-lateral), tilt (pitch-Longitudinal), and lift of the center of gravity (heave-Vertical displacement)

The calculation results show that the suspension of the design vehicle impairs its smoothness due to the effects of road irregularities (longitudinal and transverse) of the road network, which are common in large cities due to excessive traffic intensity. Ultimately, this determines the safety of vehicles. Moreover, it should be noted that in the road and climatic conditions of Kazakhstan, the most important indicator characterizing the safety of both single vehicles and traffic flows is the traction qualities of roads. Therefore, the assessment of vehicle safety is carried out taking into account the above road conditions [13-20].

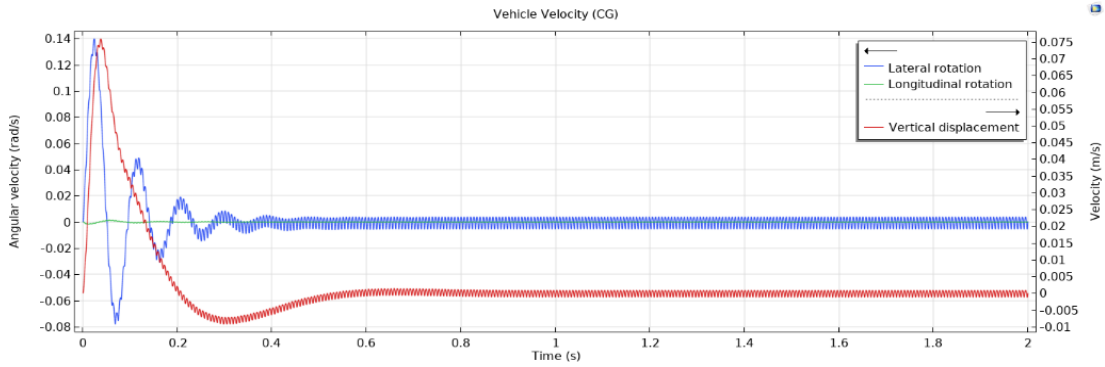


Figure 3. Dynamics of the car's roll speed fluctuation (Roll-Lateral rotation), tilt (Pitch-Longitudinal rotation) and the rise (Heave-Vertical displacement)

To assess the vibration effect on the passenger, graphs are presented in the form of dynamics of vertical movement and acceleration fluctuations in four seat locations (Fig.4-5). An analysis of the time dependence of vertical movements and seat accelerations shows that the maximum displacement at $z_{max} = 0.0129\ m$ $(12.9\ mm)$ is observed due to the impact of road bumps in the seat suspension system (Front-Left and Rear-Left). This indicates that most of the energy was

transferred to the left side of the wheels due to the difference in vertical loads between the sides of the car.

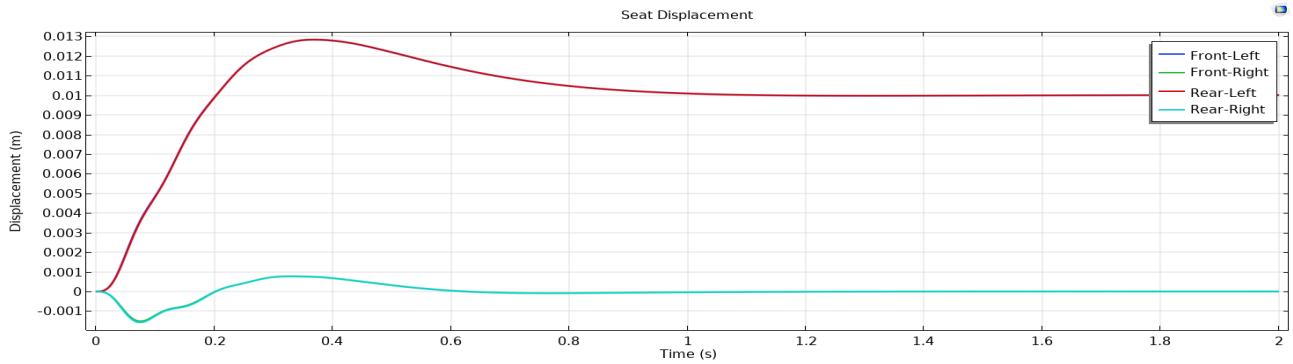


Figure 4. Dynamics of fluctuation of vertical movement and tilt of four seats

The greatest vertical acceleration is recorded synchronously for the rear left and front left (Rear-Left and Front-Left) seats and is approximately $2.5 m/s^2$. The acceleration indicator is the main indicator of comfort, since a person perceives acceleration rather than displacement. The graph shows that with vertical acceleration, $a_{max} = 2.5\, m/s^2$ the passenger experiences the greatest impact from road unevenness due to the resulting vibration of the suspension system, which gradually goes out with a corresponding decrease in amplitude. The minimum amplitude values are reached at $a = 0.5 \div 0.75\, m/s^2$, and at $t \approx 0.6\, s$ the acceleration goes into harmonic mode. This indicates a fairly effective vibration isolation of the body and an acceptable level of impact on passengers.

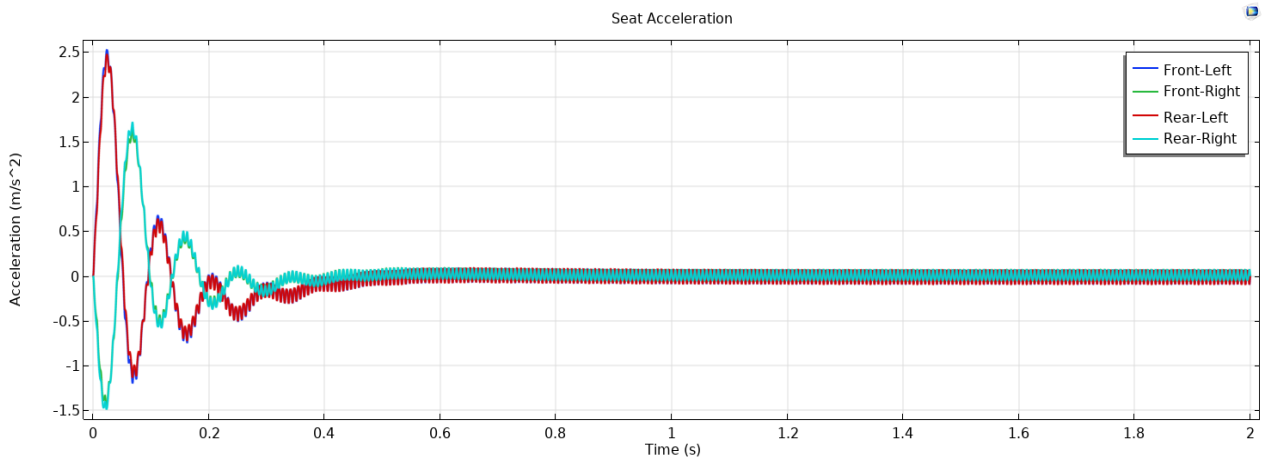


Figure 5. Dynamics of acceleration fluctuations in the rise and tilt of the seat

The above calculation results are consistent with the classical theory of vehicle oscillations and show that when a car wheel encounters a road irregularity, its ride smoothness deteriorates, which is further exacerbated by the standard rear-dependent suspension of the calculated vehicle. At the same time, these impacts of road bumps (longitudinal or transverse) also impair the handling and stability of the car and, respectively, the safety of its movement. Taking into account the propensity of a rear-wheel drive car to oversteer, the rigid dependent suspension of the design vehicle during frequent turns in urban conditions with incomplete loading will tend to skid the rear axle in adverse road conditions, which will also worsen the safety of its movement. These circumstances

seem to be especially important for the road and climatic conditions of our country, where the traction quality of roads periodically tends to decrease.

It is known that an increase in the stiffness of the suspension leads to a decrease in the margin of adhesion of the wheels to the road of the corresponding axle [21]. Therefore, if the front suspension of the calculated car is more rigid relative to the rear, then the balance of its turnability will shift towards insufficient. At the same time, the margin of adhesion of the wheels of the rear axle to the road will increase, which will help to increase the safety of its movement. Therefore, for vehicles primarily used in urban conditions with partial load, it is recommended to provide a less rigid rear suspension.

Thus, taking into account the calculation results and the analysis of the suspension operation, the paper presents a draft stabilizer for the lateral stability of the rear axle of the design vehicle in the form of a drawing of design documentation (рисунке 6).

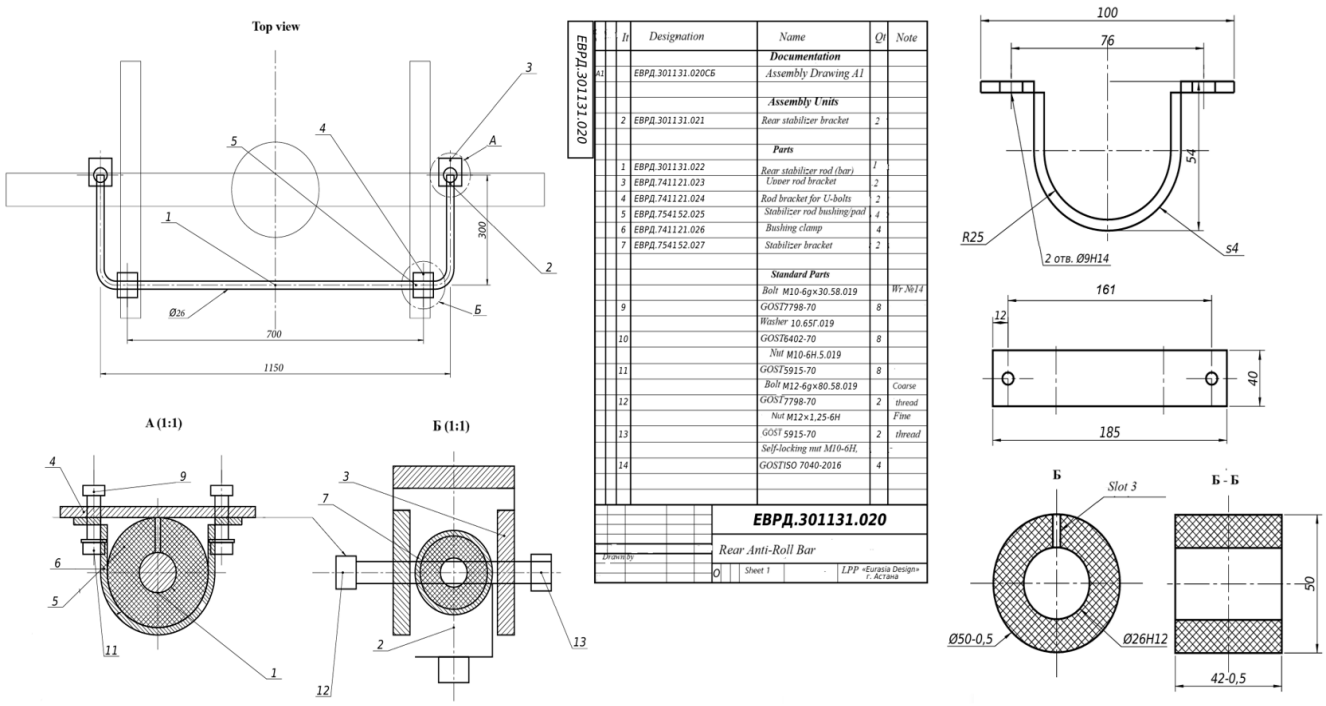


Figure 6. Engineering Drawing of the Rear Anti-Roll Bar

This project will increase the diagonal mobility of the suspension, which will ensure a smoother ride by gently working out holes and road bumps. This is confirmed by the fact that, in relation to the calculated case of hitting the left wheel of the calculated car on an unevenness, less force will be transmitted to the opposite wheel. To do this, it is necessary to equip the rear suspension of the car with a similar lateral stability stabilizer. It is not difficult to install such an option for vehicles mainly intended for frequent use in urban environments, since the disassembly and installation of the stabilizer is of little complexity.

This upgrade will allow the rear suspension of the design vehicle to work more independently by reducing stiffness by about 25%, which will reduce the amplitude and frequency of body vibrations from road bumps in the urban cycle and will increase the reserve of wheel traction when exposed to lateral forces, including cornering. Also, the proposed recommendation will make it possible to safely operate such vehicles with a full load, but on mostly straight tracks.

Conclusion

According to the obtained results of modeling the dynamics of the oscillation, the calculated graphs show that the impact of road unevenness on the suspension of the car at the initial moment causes sharp body vibrations; that is, their maximum values are observed at a time of 0.09 s, which subsequently fade due to the action of damping suspension elements. At the same time, the greatest amplitude of oscillation is observed in vertical movement. From the graphs obtained, the roll fluctuations after reaching the peak value show a sharp attenuation, and the vertical fluctuations in the center of gravity of the body show an exponentially attenuating character. Consequently, after the initial jump of vertical oscillation, the body is relatively quickly restored to the equilibrium position.

At the same time, stability remains constant for the calculated pitch conditions. The results obtained indicate that, in general, the suspension system of the design vehicle suppresses body vibrations quite effectively, but at the initial moment, rather high oscillation amplitudes are demonstrated, which worsens its operational properties. High body vibration amplitudes occur due to the influence of suspension parameters, as it impairs the smoothness of the car under the influence of road bumps, which, along with the traction qualities of the roads, determine its directional stability and traffic safety.

Therefore, to improve the safety of a design vehicle with an incomplete load for operation on the urban road network in the road and climatic conditions of Kazakhstan, it is proposed to install an appropriate lateral stability stabilizer on its rear axle. This recommendation will reduce the amplitude and frequency of vibrations of the car body in the urban cycle of operation and increase the grip margin of the wheels of its rear axle. Therefore, the proposed recommendation makes it possible to improve the smoothness and handling of the car.

Acknowledgement

This research has been funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan, grant number AP26102603 for 2025-2027.

The contribution of the authors:

T.N. Bekenov - Formulation of the research problem, analysis of theoretical data, participation in writing the main text of the article, development of the scientific interpretation of the results, coordination of the joint work of the author team.

Z.K. Sattinova - Collection and analysis of theoretical data, participation in writing the main text of the article and in the analysis of the results obtained, editing of the article.

Zh.T. Nussupbek - Participation in developing the research concept, collection and systematization of data on the vehicle's oscillatory system, participation in writing the main text of the article and in the analysis of the results obtained, scientific interpretation of the results and ensuring scientific style.

Zh.T. Tassybekov - Collection and systematization of data on the suspension system, preparation of graphic materials (diagrams/schemes), participation in discussing the results and ensuring the correctness of the wording.

References

1. Bekenov T.N. The theory of patency and turnability of self-propelled wheeled machines. Astana: Publishing house of the L. N. Gumilyov Eurasian National University, 2009. – 168c.

2. Vanquynh Le, Vanliem Nguyen, Tienhan Nguyen, Thinhien Vu, Tiendung Nguyen. Ducbinh Vu. Vibration analysis and optimal design of tracked vehicle's seat suspension for improving combat efficiency. //Scientific Reports 15, 2025 Sep 10;15:32399. doi: 10.1038/s41598-025-14859-3
3. Pengshu Xie, Yusong Che, Zhengbin Liu, Guoqiang Wang. //Research on Vibration Reduction Performance of Electromagnetic Active Seat Suspension Based on Sliding Mode Control. //Sensors (Basel). 2022 Aug 8;22(15):5916. doi: 10.3390/s22155916
4. Donghyum Kim, Yonghwan Jeong. Road-Adaptive Static Output Feedback Control of a Semi-Active Suspension System for Ride Comfort. //Actuators 2024, 13(10), 394; https://doi.org/10.3390/act13100394
5. Xiaoliang Chen, Hao Song, Sixia Zhao and Liyou Xu. Ride comfort investigation of semi-active seat suspension integrated with quarter car model. //Mechanics &Industry, 23(2022)18.
https://doi.org/10.1051/meca/2022020
6. S.H. Zareh and M. Abbasi. Semi-active vibration control of an eleven degrees of freedom suspension system using neuro inverse model of magnetorheological dampers. //Journal of Mechanical Science and Technology, vol.26, №8, pp.2459-2467, 2012. Comsol MPh
7. К.Б. Чернышев, И.М. Рябов, В.В. Новиков, А.В. Поздеев, А.М. Ковалев. Динамика движения регулируемые подвески. Волгоград, 2020.
1. https://reader.lanbook.com/book/288521#15
8. J.Y. Wong. Theory of Ground Vehicles. John Wiley&Sons, Hoboken. https://doi.org/10.1002/9781119719984
9. Michael Blundell, Damian Harty. Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics. 2004, http://www.elsevier.com
10. Hans B.Pacejka. Tyre and Vehicle Dynamics. 2006, ISBN-13: 980-0-7506-6918-4 ISBN-10: 0-7506-6918-7, publications at http://books.elsevier.com
11. 11.Tayfun Abut, Enver Salkim. Control of Quarter-Car Active Suspension System Based on Optimized Fuzzy Linear Quadratic Regulator Control Method. //Appl.Sci.2023, 13(15), 8802; https://doi.org/10.3390/app13158802
12. Zhi-Jun Fu and Xiao-Yang Dong. H∞ optimal control of vehicle active suspension systems in two time scales. Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications 2021, vol.62, №2б 284-292.https://doi.org/10.1080/00051144.2021.1935610
13. Bekenov T.N., Nussupbek Zh.T., Tassybekov Zh.T. Models to develop the operation of modular vehicle wheels. Bulletin of the Kyrgyz State University of Transport, Construction and Architecture. 2012, pp.35–41.
14. T.N. Bekenov, Zh.T. Nussupbek, Zh.T. Tassybekov, Development of model of work by modular wheels for self-propelled machines, Int, Scientific J, Trans, Motauto World (2) (2017) 45–47. https://stumejournals.com/journals/tm/2017/2/45.
15. Bekenov, T.N., Nussupbek, Z.T., Tassybekov, Z.T. To development of model of work of modular wheels of the vehicle. Bulletin of the Kyrgyz state university of construction, transport and architecture. Bishkek (2012).
16. Bekenov, T., Nussupbek, Z., Tassybekov, Z. Evaluation of the support-coupling patency of self-propelled transport // Book Chapter. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure, 2020, Part F1382, страницы 368-374 https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_46

17. Bekenov T.N., Merzadinova G.T., Nussupbek Z. Justification of model of calculation of traction passability of wheels of the all-wheel drive car (4x4) with the road / Вестник ЕНУ им.Л.Н.Гумилева, Серия Технические науки и технологии, Астана. - 2018. - С.37-44. https://doi.org/10.32523/2616-7263-2018-125-4-37-43
18. Bekenov T.N., Tassybekov Z., Nussupbek Z. Justification of the model of compaction of road foundations from road roller loads / Вестник ЕНУ им.Л.Н.Гумилева, Серия Технические науки и технологии, Астана. - 2018. - С.44-51. https://doi.org/10.32523/2616-7263-2018-125-4-44-50
19. Tassybekov, Z., Bekenov, T., Nussupbek, Z. Assessment of Compaction of the Road Base from Repeated Exposure to Frequently Repeated Loads of Self-propelled Road Roller / Book Chapter. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure, 2020, Part F1382, страницы 164-170 https://doi.org/10.1007/978-3-030-39688-6_22
20. Tassybek N. Bekenov, Zhanibek T. Nussupbek, Zhandos T. Tassybekov, Zamira K. Sattinova Development of a model for calculating the slip coefficients of a mechanical wheeled vehicle with two steering axles / Communications - Scientific Letters of the University of Zilina, 2022, 24 (3), pp. B211-B218 Scopus: CiteScore=1.6, percentile 50. https://doi.org/10.26552/com C.2022.3.B211-B218
21. Litvinov A.S. Car chassis: design and calculation elements / A.S. Litvinov, R.V. Rotenberg, A.K. Frumkin. Moscow: Mashgiz, 1963. 503 p.

Information about the authors:

Tassybek Bekenov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Faculty of Transport and Energy, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Zamira Sattinova – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Electrical Power Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Zhanibek Nussupbek – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer, Department "Transport Machinery, Technologies, Standardization and Certification," S. Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, 62 Zhenis Ave., 010011, Astana, Kazakhstan
Zhandos Tassybekov – Candidate of Technical Sciences, Director of "Eurasian Design" LLP, 54A Syganak St., 010017, Astana, Kazakhstan

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Научная статья https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-161-173

Кинематический анализ роботизированной руки Zhugirmek v1.0

Ж.Т. Жумашева[1], Е.Н. Жолдасов*[1], Ж.Ж. Байгунчеков[1], А.Ж. Абекова[2], Г.Ж. Хамитова[3*]

[1,2,3]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан
[4]Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, Алматы, Казахстан
[5] Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, Астана, Казахстан

E mail: Zhadyra_14@mail.ru, jera.kz@mail.ru, bzh47@mail.ru, Abekova310792@gmail.com, g.khamitova@kazatu.edu.kz,

Аннотация. В данной работе представлен кинематический анализ роботизированной руки гуманоидного робота Zhugirmek v1.0. Роботизированная рука имеет шесть степеней свободы, что обеспечивает возможность выполнения широкого спектра манипуляционных задач. Для математического описания пространственного движения звеньев использован метод Денавита–Хартенберга, позволяющий сформировать кинематическую модель манипулятора. Получены уравнения прямой кинематики, определяющие положение и ориентацию рабочего органа в пространстве. На основе разработанной модели выполнено моделирование движения роботизированной руки в среде MATLAB. Проведен анализ рабочей зоны манипулятора и исследованы его кинематические возможности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем управления и дальнейшей модернизации гуманоидного робота Zhugirmek v1.0. Представленные результаты анализа могут служить основой для разработки алгоритмов обратной кинематики и траекторного управления. Разработанная модель позволяет оптимизировать конструктивные параметры манипулятора для повышения его функциональности. Полученные данные важны для создания эффективных систем визуального контроля и адаптивного взаимодействия с окружающей средой.

Ключевые слова: гуманоидный робот, роботизированная рука, кинематика, прямая кинематика, MATLAB, Денавит-Хартенберг.

Received 18.06.2026. Revised 14.09.2026. Accepted 15.09.2026. Available online 30.09.2026.

* the correspondence author

Введение.

В последние годы наблюдается активное развитие гуманоидной робототехники, обусловленное необходимостью создания роботизированных систем, способных взаимодействовать с окружающей средой по аналогии с человеком. Одним из ключевых элементов гуманоидного робота являются роботизированные руки, обеспечивающие выполнение манипуляционных операций различной сложности. Для эффективного управления движением роботизированной руки необходимо разработать математическую модель, позволяющую определять положение и ориентацию рабочего органа в пространстве.

В настоящее время ведущие мировые компании, такие как Tesla, Figure AI и Agility Robotics, активно развивают гуманоидные роботы, предназначенные для работы в промышленности, логистике и сфере обслуживания. Одним из основных требований к таким роботам является наличие высокоманевренных роботизированных рук с несколькими степенями свободы. Разработка и внедрение таких роботов требует много затрат, и надо отметить, что еще не были разработаны гуманоидные роботы отечественного производства. Данное исследование ведется в рамках проекта AP25796579 при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан и направлен на разработку гуманоидного робота Zhugirmek v1.0. Конструкция робота включает мобильную платформу с четырьмя меканум-колесами, голову с двумя степенями свободы и две роботизированные руки, каждая из которых имеет шесть степеней свободы. Такая конфигурация позволяет выполнять широкий спектр операций, связанных с захватом и перемещением объектов.

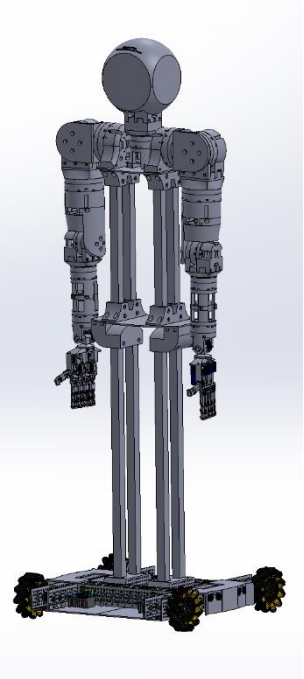


Рисунок 1. 3D модель общего вида робота Zhugirmek v1.0, разработанная в программе SolidWorks

На рисунке 1 приведена 3D модель робота Zhugirmek v1.0. Целью данной работы является разработка кинематической модели роботизированной руки гуманоидного робота Zhugirmek v1.0 и получение уравнений прямой кинематики.

Методология

Методология исследования включает:

1. Библиографический и сравнительный анализ — поиск, систематизация и изучение мировой научной литературы, статей и патентов в области гуманоидной робототехники и проектирования антропоморфных манипуляторов.
2. Математическое моделирование — исследование принципов пространственного движения звеньев руки робота и применение кинематического метода Денавита–Хартенберга.
3. Метод однородных матричных преобразований — разработка аналитических уравнений для точного определения положения и ориентации конечного эффектора в пространстве.
4. Метод компьютерного и имитационного моделирования — верификация полученных математических моделей и визуализация пространственного поведения манипулятора в специализированной программной среде.

Основные исследовательские вопросы, на которые направлено данное исследование, касаются возможности точного математического описания геометрии движений роботизированной руки с шестью степенями свободы и оценки её кинематических возможностей. В частности, исследуется, как параметры Денавита–Хартенберга адаптируются под физическую структуру плечевого, локтевого и запястного суставов робота Zhugirmek v1.0, какие аналитические зависимости связывают углы поворота в суставах с координатами рабочего органа, а также при каких условиях разработанная модель обеспечивает корректный расчет траекторий без вычислительных неопределенностей.

В рамках исследования выдвигается гипотеза о том, что применение метода Денавита–Хартенберга к оригинальной шестиосевой конструкции манипулятора позволяет получить замкнутые уравнения прямой кинематики, обеспечивающие прецизионное позиционирование рабочего органа робота Zhugirmek v1.0 в реальном времени.

Этапы исследования включают четыре основных этапа: на первом этапе был проведен сбор научно-технической литературы по теме гуманоидной робототехники и существующих методов анализа многозвенных манипуляторов. На втором этапе изучены структурно-геометрические аспекты робота Zhugirmek v1.0, разработана 3D-модель его общего вида и определены точные количественные параметры длин звеньев. На третьем этапе сформирована кинематическая диаграмма левой руки робота, расставлены локальные системы координат и рассчитана таблица параметров Денавита–Хартенберга. На основе этих данных синтезированы матрицы однородного преобразования для каждого сочленения. На четвертом этапе получено итоговое уравнение прямой кинематики, проведено численное моделирование в среде MATLAB и сформулированы выводы о работоспособности разработанной модели.

Результаты и Обсуждение.

Гуманоидный робот Zhugirmek v1.0 разработан для выполнения манипуляционных задач и воспроизведения основных движений человека. Конструкция робота включает голову с двумя вращательными степенями свободы, две роботизированные руки, каждая

из которых обладает шестью вращательными степенями свободы, а также мобильную платформу на меканум-колесах.

Мобильная платформа имеет три степени свободы: две поступательные по осям X и Y и одну вращательную вокруг вертикальной оси Z. Такая кинематическая структура обеспечивает возможность перемещения робота в произвольном направлении без изменения ориентации корпуса, а также выполнение маневров в ограниченном пространстве.

Совокупность подвижных звеньев головы, роботизированных рук и мобильной платформы обеспечивает высокую маневренность робота и позволяет выполнять спектр задач, связанных с захватом, удержанием и перемещением объектов. Структурная схема гуманоидного робота Zhugirmek v1.0 представлена на рисунке 2.

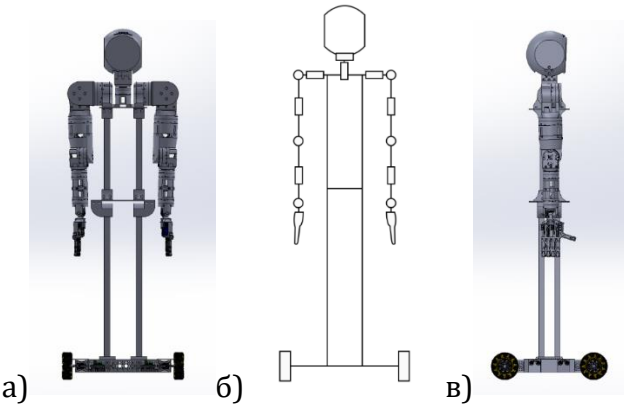


Рисунок 2. а) передний вид робота; б) структурная схема робота; в) вид робота справа

Для дальнейшего математического описания движения руки робота была сформирована кинематическая диаграмма (Рисунок 3) и введены системы координат в соответствии с методом Денавита–Хартенберга (DH).

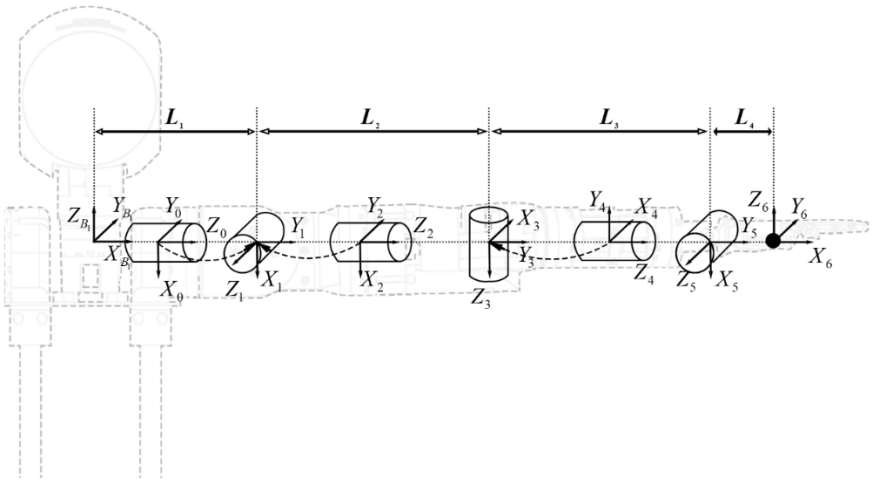


Рисунок 3. Кинематическая структура левой руки робота Zhugirmek v1.0.

Кинематическая структура роботизированной руки состоит из четырех основных звеньев. Длина первого звена составляет L_1 = 170 мм, второго звена — L_2 = 300 мм, третьего звена — L_3 = 200 мм, а длина четвертого звена составляет L_4 = 70 мм. Общая длина руки от основания до рабочего органа составляет 740 мм.

Координатные системы расположены следующим образом. Базовая система координат $O_{B_1}X_{B_1}Y_{B_1}Z_{B_1}$ устанавливается в центре шеи и служит базовой системой координат для головы и рук [1][3]. Прямая кинематическая задача заключается в определении положения и ориентации рабочего органа по известным значениям обобщенных координат манипулятора. В рассматриваемой роботизированной руке такими координатами являются углы поворота шести вращательных сочленений.

Для математического описания пространственного движения роботизированной руки использован метод DH, который является одним из наиболее распространенных методов моделирования последовательных манипуляторов [2]. Согласно данному методу каждому звену манипулятора присваивается собственная система координат (Рисунок 3), а взаимное расположение соседних звеньев описывается четырьмя параметрами: углом поворота θ_i, линейным смещением d_i, длиной звена a_i и углом скручивания α_i [3]. В целях упрощения кинематической модели базовая система координат была размещена в центре плечевого сустава руки. В связи с этим расстояние от центра корпуса до плечевого сустава L_1 не учитывается в модели.

1. Определение параметра d_i.

Параметр d_i характеризирует расстояние от начала $(i-1)$ –й системы координат до точки пересечения оси z_{i-1} с осью x_i, измеряемое вдоль оси z_{i-1}. В этом случае:

1.1) d_1=0 мм (расстояние от начала координаты O_0 до точки пересечения оси z_0 с осью x_1, измеряемое вдоль оси z_0);

1.2) d_2=0 мм (расстояние от начала координаты O_1 до точки пересечения оси z_1 с осью x_2, измеряемое вдоль оси z_1);

1.3) d_3=300 мм (расстояние от начала координаты O_2 до точки пересечения оси z_2 с осью x_3, измеряемое вдоль оси z_2);

1.4) d_4=0 мм (расстояние от начала координаты O_3 до точки пересечения оси z_3 с осью x_4, измеряемое вдоль оси z_3);

1.5) d_5=200 мм (расстояние от начала координаты O_4 до точки пересечения оси z_4 с осью x_5, измеряемое вдоль оси z_4);

1.6) d_6=0 мм (расстояние от начала координаты O_5 до точки пересечения оси z_5 с осью x_6, измеряемое вдоль оси z_5).

2. Опрделение параметра a_i.

Параметр a_i представляет собой расстояние от точки пересечения оси z_{i-1} с осью x_i до начала i-й системы координат, измеряемое вдоль оси x_i. В этом случае:

2.1) a_1= 0 мм (расстояние от точки пересечения оси z_0 с осью x_1 до начала системы координат O_1, измеряемое вдоль оси x_1);

2.2) a_2= 0 мм (расстояние от точки пересечения оси z_1 с осью x_2 до начала системы координат O_2, измеряемое вдоль оси x_2);

2.3) a_3= 0 мм (расстояние от точки пересечения оси z_2 с осью x_3 до начала системы координат O_3, измеряемое вдоль оси x_3);

2.4) a_4= 0 мм (расстояние от точки пересечения оси z_3 с осью x_4 до начала системы координат O_4, измеряемое вдоль оси x_4);

2.5) a_5= 0 мм (расстояние от точки пересечения оси z_4 с осью x_5 до начала системы координат O_5, измеряемое вдоль оси x_5);

2.6) a_6= 70 мм (расстояние от точки пересечения оси z_5 с осью x_6 до начала системы координат O_6, измеряемое вдоль оси x_6).

3. Определение параметра θ_i.

Параметр θ_i определяет угол поворота оси x_{i-1} вокруг оси z_{i-1}, необходимый для её совмещения с осью x_i. Для вращательного сочленения параметр θ_i является переменной обобщённой координатой. Знак угла θ_i определяется в соответствии с правилом правой руки. Направление положительного вращения рассматривается вдоль положительного направления оси z_{i-1}. При повороте оси x_{i-1} к оси x_i против часовой стрелки угол θ_i считается положительным, а при повороте по часовой стрелке — отрицательным. В этом случае:

3.1) θ_1 = 0 (угол поворота оси x_0 вокруг оси z_0, необходимый для её совмещения с осью x_1, поскольку оси x_0 и x_1 совпадают по направлению значение параметра θ_1=0);

3.2) θ_2 = 0 (угол поворота оси x_1 вокруг оси z_1, необходимый для её совмещения с осью x_2, поскольку оси x_1 и x_2 совпадают по направлению значение параметра θ_2=0);

3.3) θ_3 = 90 (угол поворота оси x_2 вокруг оси z_2, необходимый для её совмещения с осью x_3. Для определения знака угла θ_1 необходимо рассматривать направление вращения вдоль положительного направления оси z_2. При повороте оси x_2 к оси x_3 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол θ_3 является положительным);

3.4) θ_4 = 0 (угол поворота оси x_3 вокруг оси z_3, необходимый для её совмещения с осью x_4, поскольку оси x_3 и x_4 совпадают по направлению значение параметра θ_4=0);

3.5) θ_5 = -90 (угол поворота оси x_4 вокруг оси z_4, необходимый для её совмещения с осью x_5. Для определения знака угла θ_5 необходимо рассматривать направление вращения вдоль положительного направления оси z_4. При повороте оси x_4 к оси x_5 по кратчайшему пути наблюдается вращение по часовой стрелке. В соответствии с правилом правой руки угол θ_5 является отрицательным);

3.6) θ_6 = 90 (угол поворота оси x_5 вокруг оси z_5, необходимый для её совмещения с осью x_6. Для определения знака угла θ_6 необходимо рассматривать направление вращения вдоль положительного направления оси z_5. При повороте оси x_5 к оси x_6 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол θ_6 является положительным).

4. Определение параметра α_i.

Параметр α_i задаёт угол поворота оси z_{i-1} вокруг оси x_i, необходимый для её совмещения с осью z_i. Знак угла α_i определяется в соответствии с правилом правой руки.

4.1) α_1=90 (угол поворота оси z_0 вокруг оси x_1, необходимый для её совмещения с осью z_1. При повороте оси z_0 к оси z_1 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол α_1 является положительным);

4.2) α_2= -90 (угол поворота оси z_1 вокруг оси x_2, необходимый для её совмещения с осью z_2. При повороте оси z_1 к оси z_2 по кратчайшему пути наблюдается вращение по часовой стрелке. В соответствии с правилом правой руки угол α_2 является отрицательным);

4.3) α_3=90 (угол поворота оси z_2 вокруг оси x_3, необходимый для её совмещения с осью z_3. При повороте оси z_2 к оси z_3 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол α_3 является положительным);

4.4) α_4= -90 (угол поворота оси z_3 вокруг оси x_4, необходимый для её совмещения с осью

z_4. При повороте оси z_3 к оси z_4 по кратчайшему пути наблюдается вращение по часовой стрелке. В соответствии с правилом правой руки угол α_4 является отрицательным);

4.5) α_5=90 (угол поворота оси z_4 вокруг оси x_5, необходимый для её совмещения с осью z_5. При повороте оси z_4 к оси z_5 по кратчайшему пути наблюдается вращение против часовой стрелки. В соответствии с правилом правой руки угол α_5 является положительным);

4.6) α_6=-90 (угол поворота оси z_5 вокруг оси x_6, необходимый для её совмещения с осью z_6. При повороте оси z_5 к оси z_6 по кратчайшему пути наблюдается вращение по часовой стрелке. В соответствии с правилом правой руки угол α_6 является отрицательным).

На основании выполненного анализа взаимного расположения систем координат и определения параметров DH для каждого сочленения роботизированной руки были получены значения параметров θ_i, d_i, a_i и α_i [4]. Результаты расчёта и принятые параметры кинематической модели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры Денавита Хартенберга левой руки робота Zhugirmek v1.0.

i	θ_i	α_i	a_i	d_i
1	0	90	0	0
2	0	-90	0	0
3	90	90	0	300
4	0	-90	0	0
5	-90	90	0	200
6	90	-90	70	0

Матрица DH использует эти четыре параметра для определения положения и направления каждой дополнительной связи или соединения. Матрица DH для каждого соединения записывается следующим образом:

$$\mathbf{A}_i^{i-1} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i \cdot s\theta_i & s\alpha_i \cdot s\theta_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i \cdot c\theta_i & -s\alpha_i \cdot c\theta_i & a_i \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 0 & \\ 0 & \mathbf{R}_{i-1}^{i} & 0 & \mathbf{p}_{i-1}^{i} \\ 0 & 0 & 0 & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \quad (1)$$

В формуле (1) используются следующие сокращения: $c\theta_i = cos\theta_i$, $s\theta_i = sin\theta_i$, $c\alpha_i = cos\alpha_i$, $s\alpha_i = sin\alpha_i$.

Матрица R описывает вращение или ориентацию объекта. Эта матрица представляет собой изменение системы координат объекта в пространстве. Обычно матрица R имеет размер 3×3 и выполняет вращение, необходимое для перехода из одной системы координат в другую. Она описывает вращение объекта в трех основных направлениях.

Вектор p представляет собой положение или перемещение объекта в пространстве. Этот вектор представляет координаты начального или конечного положения объекта в пространстве. Обычно вектор p представляет положение точки (например, центра объекта) в одной системе координат. Этот вектор описывает положение объекта или изменение положения определенной точки в новой системе координат.

Подставляя значения параметров ДХ, приведенные в таблице 1, в матрицу однородного преоброзования A_i^{i-1}, получаем матрицы преобразования для каждого сочленения роботизированной руки:

$$ {}^{0}_{1}\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} cos\theta_1 & 0 & sin\theta_1 & 0 \\ sin\theta_1 & 0 & -cos\theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

После получения матриц однородного преобразования для каждого сочленения выполяется их последовательное переумножение. В результате формируется итоговая матрица прямой кинематики, определяющая положение и орентацию конечного звена роботозированной руки относительно базовой системы координат:

$$ {}^{1}_{-}\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad {}^{4}_{-}\mathbf{A}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 200 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{2}_{-}\mathbf{A}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 300 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad {}^{5}_{-}\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 70 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

$$ {}^{3}_{-}\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Из формулы (2) видно, что при полностью вытянутой кофигурации руки расстояние от основания до конечного эффектора равно 570 мм [5]. Верхний левый блок матрицы с размерами 3x3 характеризует ориентацию конечного звена относительно базовой системы координат. Последний столбец матрицы определяет положение конечного звена относительно базовой системы координат:

$$ \mathrm{P} = [\mathrm{x\ y\ z}]^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 570 \end{bmatrix}, \qquad (3) $$

На основе кинематической модели была разработана и реализована программа в среде MATLAB (рисунок 4), позволяющая вычислить положение рабочего органа при заданных углах поворота суставов, а также визуализировать пространственное положение роботизированной руки в реальной времени. Эта программа позволяет задавать значения углов поворота всех шести суставов и отображать соответствующие пространственные положения звеньев руки робота. Координаты конечного эффектора вычисляются на основе кинематической модели и матриц преобразования DH. Таким образом, при заданных параметрах звеньев и угловых положениях сочленений рабочий орган робота

Zhugirmek v1.0 располагается на расстоянии 570 мм от базовой системы координат вдоль оси z_0.

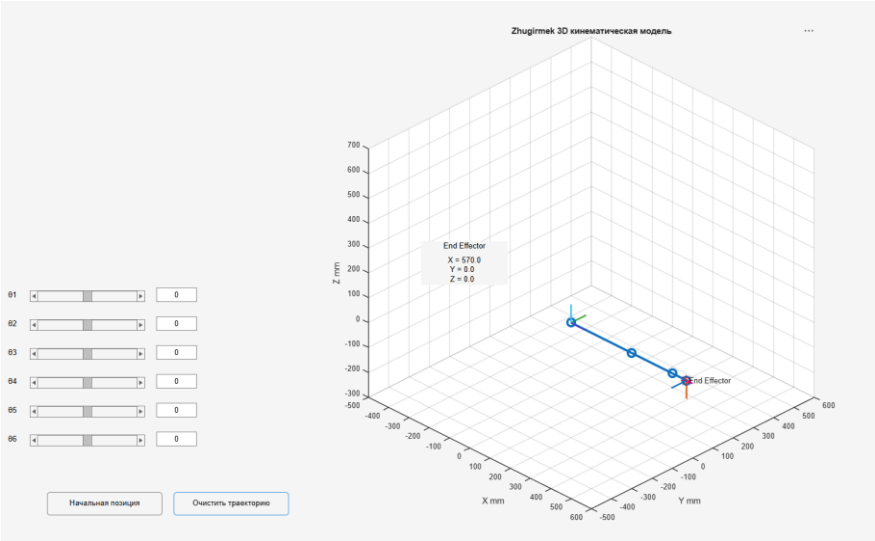


Рисунок 4. Кинематическая диаграмма левой руки робота Zhugirmek v1.0.

Заключение

В данной работе разработана нижняя мобильная платформа робота с колесами меканум, проведен структурный анализ и разработана конструкция роботизированной руки гуманоидного робота Zhugirmek v1.0, выполнен ее кинематический анализ. Для описания пространственного положения звеньев была сформирована кинематическая схема руки робота и построена система координат для каждого сочленения в соответствии с методом Денавита-Хартенберга. На основе полученных параметров были определены матрицы однородных преобразований и разработана математическая модель прямой кинематики. Полученные аналитические зависимости позволяют вычислять положение и ориентацию конечного эффектора по заданным значениям углов поворота суставов. Для проверки корректности разработанной модели была реализована программа в среде MATLAB, обеспечивающая визуализацию пространственного положения роботизированной руки и расчет координат рабочего органа. Результаты моделирования подтвердили работоспособность разработанной кинематической модели и возможность ее дальнейшего использования при разработке алгоритмов управления робота.

Полученная кинематическая модель в дальнейшем может служить основой для решения задач обратной кинематики, динамики, планирования траектории движения и создания системы управления роботизированной руки.

Благодарность, конфликт интересов

Данная работа выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках проекта AP25796579 «Разработка гуманоидного робота Zhugirmek v1.0».

Вклад авторов

Жумашева Ж.Т. – внесла значительный вклад в разработку концепции, систематизацию параметров и критический пересмотр содержания статьи. Она определила ключевые

направления кинематического анализа шестизвенного манипулятора, провела детальный анализ существующих мировых аналогов гуманоидных роботов, что позволило обосновать корректность применения выбранного метода и сформулировать итоговые выводы.
Жолдасов Е.Н. – внес существенный вклад в сбор первичных данных, проведение аналитических расчетов и программную реализацию исследования. Им была разработана трехмерная модель робота в SolidWorks, составлена таблица параметров Денавита-Хартенберга, выведены уравнения прямой кинематики, а также осуществлено имитационное моделирование и визуализация пространственного движения руки робота в среде MATLAB.
Байгунчеков Ж.Ж. – внес определяющий вклад в разработку теоретической концепции исследования, определение методологического базиса и критический пересмотр содержания рукописи. Он сформулировал основополагающие принципы структурно-кинематического анализа антропоморфных систем, утвердил окончательный вариант статьи для публикации, а также обеспечил надлежащее изучение и решение всех вопросов, связанных с достоверностью математических данных и целостностью всех частей исследования.
Абекова А.Ж. — сбор данных, анализ результатов, написание отдельных разделов статьи.
Хамитова Г. — сбор данных, интерпретация результатов.

Список литературы

1. Z Baigunchekov, G. Carbone, Z. Zhumasheva, B. Amanov, Y. Zholdassov and S. Tolenov, “Kinematics of the ‘Ai-Gerim’ robot arm,” in Mechanisms and Machine Science: Advances in Service and Industrial Robotics (RAAD 2022), pp. 11-18, 2022.
2. N. A. M. Ali et al., “Kinematics analysis of humanoid robot arm,” in Proc. Int. Undergraduate Research Conf., 2021.
3. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1987, 29-68 pp.
4. X. Zhang et al., “Structural design and kinematic analysis of humanoid robot arm,” Int. J. Robotics and Automation, 2022.
5. R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1994.
6. Saci Felahi, Walid Mohamedi (2024) Order Analysis of a Vibration Signal of a Rotating Machine. Journal of Biosensors and Bioelectronics Research. SRC/JBBER-121. https://doi.org/10.47363/JBBER/2024(2)114
7. Randall, R. B. A history of cepstrum analysis for machine diagnostics. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 97: 3–19. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.12.026
8. Lei, Y.; et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 106587. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587
9. Zhao, R.; et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115: 213–237. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050
10. Nguyen, V.-T.; Diep, Q. B. Vibration-based gearbox fault diagnosis using a multi-scale CNN with depth-wise feature concatenation. PLOS ONE, 2025, 20(7): e0324905. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324905

11. Wang X.; et al. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network. Measurement, 2021, 173: 108518. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108518
12. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, Vol. 65(7), pp. 5990–5998. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2774777
13. Zhang S., Zhang S., Wang B., Habetler T. G. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics - A comprehensive review. IEEE Access, 2021, Vol. 9, pp. 104518–104538. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972859
14. Li X., Ding Q., Sun J.-Q. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks. Reliability Engineering & System Safety, 2018, Vol. 172, pp. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.021
15. Bi Z., Yu X., Huangfu Y., Yao J., Zhou P., He Q., Peng Z. Vibration source inversion-based fault diagnosis: Approach and application. Journal of Sound and Vibration, 2025, Vol. 597, Part B, 118818. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118818
16. K. Horváth, " Noise, Vibration, and Harshness (NVH) Challenges in Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles," Energy Science & Engineering 0 (2025): 1-14, https://doi.org/10.1002/ese3.70400.

Zh.T. Zhumasheva[1], Y.N. Zholdassov [1], Zh. Zh. Baigunchekov[1], A. Abekova[2], G. Khamitova[3]

[1] al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
[2]Kazakh national research technical university, Republic of Kazakhstan
[3]S.Seifullin Kazakh agro technical research university,Astana, Republic of Kazakhstan

Kinematic analysis of the Zhugirmek v1.0 robotic arm

Abstract. This paper presents a kinematic analysis of the robotic arm of the Zhugirmek v1.0 humanoid robot. The robotic arm has six degrees of freedom, enabling it to perform a wide range of manipulation tasks. The Denavit–Hartenberg method was used to mathematically describe the spatial motion of the links, allowing the formation of a kinematic model of the manipulator. Forward kinematic equations were derived that determine the position and orientation of the end-effector in space. Based on the developed model, the robotic arm's motion was simulated in MATLAB. The manipulator's working area was analyzed, and its kinematic capabilities were investigated. The obtained results can be used in the development of control systems and further modernization of the Zhugirmek v1.0 humanoid robot.

Keywords: humanoid robot, robotic arm, kinematics, forward kinematics, MATLAB, Denavit-Hartenberg

References

1. Z Baigunchekov, G. Carbone, Z. Zhumasheva, B. Amanov, Y. Zholdassov and S. Tolenov, "Kinematics of the 'Ai-Gerim' robot arm," in Mechanisms and Machine Science: Advances in Service and Industrial Robotics (RAAD 2022), pp. 11-18, 2022.
2. N. A. M. Ali et al., "Kinematics analysis of humanoid robot arm," in Proc. Int. Undergraduate Research Conf., 2021.

3. Fu K.S., Gonzalez R.C., Lee C.S.G. Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence. – New York: McGraw-Hill Book Company, 1987, 29-68 pp.
4. X. Zhang et al., "Structural design and kinematic analysis of humanoid robot arm," Int. J. Robotics and Automation, 2022.
5. R. M. Murray, Z. Li, and S. S. Sastry, A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1994.
6. Saci Felahi, Walid Mohamedi (2024) Order Analysis of a Vibration Signal of a Rotating Machine. Journal of Biosensors and Bioelectronics Research. SRC/JBBER-121. https://doi.org/10.47363/JBBER/2024(2)114
7. Randall, R. B. A history of cepstrum analysis for machine diagnostics. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 97: 3–19. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.12.026
8. Lei, Y.; et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 106587. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587
9. Zhao, R.; et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 115: 213–237. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050
10. Nguyen, V.-T.; Diep, Q. B. Vibration-based gearbox fault diagnosis using a multi-scale CNN with depth-wise feature concatenation. PLOS ONE, 2025, 20(7): e0324905. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324905
11. Wang X.; et al. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network. Measurement, 2021, 173: 108518. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108518
12. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, Vol. 65(7), pp. 5990–5998. https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2774777
13. Zhang S., Zhang S., Wang B., Habetler T. G. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics - A comprehensive review. IEEE Access, 2021, Vol. 9, pp. 104518–104538. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972859
14. Li X., Ding Q., Sun J.-Q. Remaining useful life estimation in prognostics using deep convolution neural networks. Reliability Engineering & System Safety, 2018, Vol. 172, pp. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.021
15. Bi Z., Yu X., Huangfu Y., Yao J., Zhou P., He Q., Peng Z. Vibration source inversion-based fault diagnosis: Approach and application. Journal of Sound and Vibration, 2025, Vol. 597, Part B, 118818. https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118818
16. K. Horváth, " Noise, Vibration, and Harshness (NVH) Challenges in Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles," Energy Science & Engineering 0 (2025): 1-14, https://doi.org/10.1002/ese3.70400.

Сведения об авторах:

Жумашева Жадыра Токановна – кандидат технических наук, профессор, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Байгунчеков Жумадил Жанабаевич – доктор технических наук, профессор, академик НАН РК, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Жолдасов Ернар Нурдосулы – автор для корреспонденции, магистр, научный сотрудник, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, проспект Аль-Фараби, 71, 050040, Алматы, Казахстан.

Абекова Айдана Жумагалиевна – старший преподователь, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан.
Хамитова Гульжазира – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, Казахский агротехнический исследовательский университет имени С.Сейфуллина, Астана, Казахстан.

Zhumasheva Zh.T. – Candidate of Technical Sciences, Professor, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, 050040, Almaty, Kazakhstan
Baigunchekov Zh.Zh. - Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, 050040, Almaty, Kazakhstan.
Zholdassov Y.N. - Corresponding author, Master degree, research fellow, Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, 050040, Almaty, Kazakhstan.
Abekova A.Zh.- senior lector, Kazakh National Research Technical University, 22 Satpayev St., Almaty, Kazakhstan.
Khamitova Gulzhazira – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, S.Seifullin Kazakh Agro Technical Research University, Astana, Republic of Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Научная статья https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-174-192

Расчет конструктивных параметров регулярной насадки тепломассообменного аппарата на трубах-струнах

Е.А. Жидебаев , О.А. Шохаев , А.А. Волненко , Д.К. Жумадуллаев*

Южно-Казахстанский университет им.М.Ауэзова, Шымкент, Казахстан

E mail: daulet_ospl@mail.ru, nii_mm@mail.ru, 742186vr@mail.ru, Zhidebayev_Yeldos@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены конструкции тепломассообменных аппаратов с регулярной насадкой на трубах-струнах. Насадка выполнена в виде пластинчатых и лопастных элементов, закреплённых на трубчатом каркасе. На основе анализа геометрии насадочных элементов и их расположения в рабочем объёме аппарата предложена расчётная схема элементарной ячейки. С учётом особенностей движения газового потока по каналам, образованным элементами насадки, получены уравнения для определения пористости насадки в поперечном сечении аппарата, объёмной пористости и эквивалентного диаметра. В расчётных зависимостях учтены геометрические параметры насадочных элементов. Также учтены радиальные и вертикальные шаги их размещения. Проведено сравнение расчётных данных для пластинчатой и лопастной насадок на трубах-струнах. Кроме того, выполнено сопоставление с аналогичной конструкцией насадки на проволочных струнах. Установлено, что лопастная насадка обладает более высокой пористостью в сечении аппарата. Это способствует снижению гидравлического сопротивления. В то же время пластинчатая насадка характеризуется меньшим эквивалентным диаметром и более развитой поверхностью контакта фаз. Благодаря этому создаются благоприятные условия для интенсификации процессов тепло- и массообмена.

Ключевые слова: тепломассообменный аппарат, регулярная насадка, трубы-струны, пластинчатая насадка, лопастная насадка, порозность, объемная порозность, эквивалентный диаметр, удельная поверхность.

Received 10.05.2026. Revised 28.08.2026. Accepted 31.08.2026. Available online 30.09.2026

* the correspondence author

Введение

В химической, нефтехимической, энергетической и металлургической промышленности широко применяются аппараты для проведения процессов тепло- и массообмена. Одними из наиболее распространённых аппаратов являются насадочные колонны, которые обеспечивают эффективный контакт газовой и жидкой фаз и отличаются высокой производительностью и относительной простотой конструкции [1]. Повышение эффективности тепломассообменных процессов является важной задачей современной химической технологии, поскольку позволяет снизить энергозатраты и повысить производительность технологических установок.

В настоящее время разработан широкий спектр аппаратов с трубчатой насадкой регулярной структуры и различными вариантами размещения труб [1]. В частности, к ним относятся аппараты с гладкими прямыми трубами [2], а также конструкции с турбулизаторами теплоносителя, размещёнными внутри труб [3,4]. Значительное внимание уделено аппаратам с комбинированными регулярно-взвешенными насадками, включая трубчато-взвешенные [5] и трубчато-фонтанирующие системы [6]. Кроме того, предложены конструкции с раздельными коллекторами для подачи и отвода теплоносителя в четных и нечетных слоях регулярной кольцевой трубчатой насадки [7]. С целью повышения компактности разработаны аппараты с размещением коллекторов непосредственно в зоне контакта фаз [8], а также двухступенчатые аппараты ударно-вихревого действия с трубчатой насадкой [9]. Отдельный интерес представляют конструкции, обеспечивающие чередование противоточного движения потоков теплоносителей в трубах по сечению рабочей зоны насадки [10]. Для проведения исследований гидродинамики и процессов тепломассообмена ранее был разработан аппарат с регулярной насадкой, выполненной в виде системы непрерывно и последовательно соединённых труб одного диаметра, размещённых внутри корпуса аппарата [11].

Современные исследования показывают, что эффективность регулярных насадок в значительной степени определяется их геометрическими параметрами и условиями распределения потоков фаз в аппарате [12]. В связи с этим большое внимание уделяется разработке новых конструкций регулярных насадок. Также активно совершенствуются методы расчёта их гидродинамических и тепломассообменных характеристик.

Для исследования процессов, протекающих в насадочных аппаратах, применяются как экспериментальные методы, так и численное моделирование. В частности, широко используются методы вычислительной гидродинамики (CFD) [13–14].

Одним из перспективных направлений совершенствования тепломассообменных аппаратов является использование регулярных насадок, установленных на трубчатых каркасных элементах — трубах-струнах. Применение труб-струн позволяет повысить механическую прочность конструкции насадки. Одновременно с этим формируется развитая поверхность контакта фаз.

В качестве насадочных элементов могут использоваться различные конструктивные решения. Наиболее распространёнными являются пластинчатые и лопастные элементы. Их применение способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена.

При проектировании тепломассообменных аппаратов с регулярной насадкой важное значение имеет определение основных конструктивных параметров насадки. К ним

относятся пористость насадки в сечении аппарата, объёмная пористость и эквивалентный диаметр.

Эти параметры оказывают существенное влияние на гидродинамические характеристики аппарата, распределение фаз и эффективность тепломассообменных процессов [15]. Вместе с тем для регулярных насадок, устанавливаемых на трубах-струнах, вопросы определения указанных параметров пока изучены недостаточно.

В связи с этим целью настоящей работы является разработка расчётных зависимостей для определения конструктивных параметров регулярной насадки тепломассообменного аппарата на трубах-струнах. Актуальность исследования обусловлена необходимостью совершенствования конструкций регулярных насадок и повышения эффективности процессов тепло- и массообмена.

В работе рассмотрены пластинчатые и лопастные элементы насадки. Для данных конструкций получены уравнения расчёта пористости в поперечном сечении аппарата, объёмной пористости и эквивалентного диаметра. При этом в расчётах учтены геометрические характеристики насадочных элементов и шаги их размещения.

Научная новизна работы заключается в разработке расчётных зависимостей для определения порозности насадки в сечении и объеме аппарата и эквивалентного диаметра новой конструкции регулярной насадки на трубах-струнах. Отличительной особенностью конструкции является использование турбулизирующих пластинчатых и лопастных элементов.

Методология

В настоящей работе анализ конструктивных параметров регулярной насадки тепломассообменного аппарата на трубах-струнах основан на геометрическом моделировании формы насадки и определении её ключевых характеристик. Основные параметры, подлежащие расчету – это порозность в сечении аппарата, объемная порозность и эквивалентный диаметр насадки.

Регулярная насадка рассматривается как упорядоченная структура, состоящая из повторяющихся элементов, закрепленных на трубах-струнах и распределённых по объёму аппарата. В зависимости от конструктивного варианта, такими элементами являются либо пластинчатые, либо лопастные тела, обеспечивающие развитую поверхность контакта фаз.

Перед началом аналитических расчётов необходимо определить геометрические исходные параметры насадки: диаметр труб, размеры насадочных элементов и шаги их размещения по горизонтали и вертикали. Эти параметры задают форму и размеры расчётных ячеек, которые служат основой для последующих вычислений.

Порозность насадки в поперечном сечении определяется как отношение свободного пространства, через которое может проходить поток, к общей площади сечения аппарата. Для этого рассматривается элементарная ячейка сечения, размеры которой определяются шагом между соседними трубами-струнами. Свободная площадь ячейки получается как разность между общей площадью ячейки и площадью, занятою трубами и насадочными элементами.

Объёмная пористость характеризует долю свободного объёма насадки в рабочем объёме аппарата. Для её расчёта выделяется элементарная объёмная ячейка, размеры которой соответствуют шагам размещения элементов конструкции. При этом свободный объём определяется как разность между объёмом расчётной ячейки и суммарным объёмом насадочных элементов, расположенных внутри неё.

Эквивалентный диаметр рассматривается как обобщённая характеристика геометрии насадки. Его определяют на основе соотношения между свободным объёмом насадки и общей площадью поверхности её элементов.

Удельная поверхность насадки включает поверхность труб-струн и поверхности пластинчатых или лопастных элементов. Данный параметр имеет важное значение, поскольку оказывает влияние на распределение фаз и интенсивность процессов тепло- и массообмена.

Предложенный подход позволяет аналитически оценивать влияние геометрических параметров насадки на её конструктивные характеристики. Полученные зависимости могут применяться при проектировании и оптимизации тепломассообменных аппаратов с регулярными насадками на трубах-струнах.

Результаты и Обсуждение

Квадратные пластины на трубах-струнах

Конструктивные параметры пластинчатой насадки на трубах-струнах (порозность в сечении аппарата, объемная порозность и эквивалентный диаметр).

На рисунке 1 представлена ячейка пластинчатой насадки в сечении аппарата размером $t_p x t_p$.

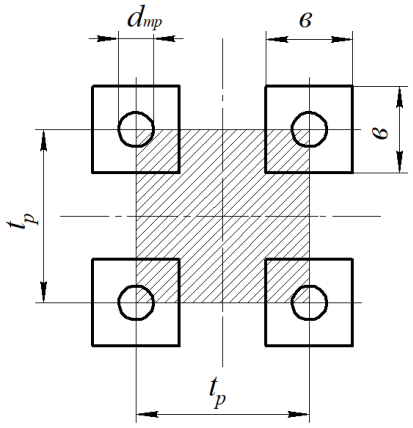


Рисунок 1. Фрагмент пластинчатой насадки на трубах-струнах в сечении аппарата

Порозность насадки в сечении аппарата определяется по зависимости:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{S_{эл}}{S_{яч}}, \quad (1)$$

где $S_{эл}$ – площадь элементов в миделевом сечении, входящих в ячейку, м^2; $S_{яч}$- площадь ячейки, м^2.

Площадь элементов в миделевом сечении определим по формуле:

$$S_{эл} = b^2 - 0{,}785 \cdot d_{тр}^2 \quad (2)$$

Площадь ячейки определим по формуле:

$$S_{яч} = t_р^2 \quad (3)$$

После подстановки формул (2) и (3) в выражение (1) получим:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{b^2 - 0{,}785 \cdot d_{тр}^2}{t_р^2} \quad (4)$$

На рисунке 2 представлена ячейка пластинчатой насадки в объеме аппарата размером $t_р x t_р x t_в$.

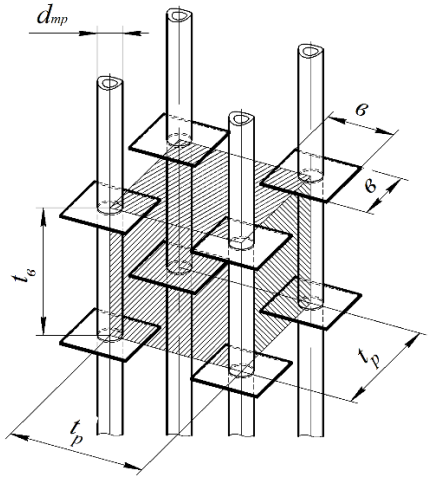


Рисунок 2. Ячейка пластинчатой насадки на трубах-струнах в объеме аппарата

Объемная порозность пластинчатой насадки на трубах-струнах определяется по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{эл}}{V_{яч}}, \quad (5)$$

где $V_{эл}$ – объем элементов насадки, входящих в ячейку, м^3; $V_{яч}$- объем ячейки, м^3.

Объем элементов насадки определяется по формуле:

$$V_{эл} = 2 \cdot \delta \cdot \left(b^2 - 0{,}785 \cdot d_{тр}^2\right) \quad (6)$$

Объем ячейки определим по формуле:

$$V_{\text{яч}} = t_{\text{р}}^2 \cdot t_{\text{в}} \tag{7}$$

Подставляя (6) и (7) в уравнение (5), получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\delta \cdot \left(b^2 - 0{,}785 \cdot d_{\text{тр}}^2\right)}{t_{\text{р}}^2 \cdot t_{\text{в}}} \tag{8}$$

Эквивалентный диаметр пластинчатой насадки на трубах-струнах рассчитывается по формуле [16]:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_{\text{н}}} \tag{9}$$

Удельную поверхность пластинчатой насадки определим по формуле:

$$a_{\text{н}} = \frac{S_{\text{эл}}^{\text{н}}}{V_{\text{яч}}} \tag{10}$$

Удельная площадь составляющих элементов пластинчатой насадки на трубах-струнах определим по формуле:

$$S_{\text{эл}}^{\text{н}} = S_{\text{пл}}^{\text{н}} + S_{\text{тр}}^{\text{н}} \tag{11}$$

Удельная поверхность пластин:

$$S_{\text{пл}}^{\text{н}} = 2 \cdot \left[\left(b^2 - 0{,}785 \cdot d_{\text{тр}}^2\right) + 2 \cdot b \cdot \delta\right] \tag{12}$$

Удельная поверхность труб:

$$S_{\text{тр}}^{\text{н}} = \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_{\text{в}} \tag{13}$$

Подставляя (12) и (13) в формулу (11), получим:

$$S_{\text{эл}}^{\text{н}} = 2 \cdot \left[\left(b^2 - 0{,}785 \cdot d_{\text{тр}}^2\right) + 2 \cdot b \cdot \delta\right] + \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_{\text{в}} \tag{14}$$

Объем ячейки определим по формуле (7). Подставляя (14) и (7) в уравнение (10), получим:

$$a_{\text{н}} = \frac{2\cdot\left[\left(b^2-0{,}785\cdot d_{\text{тр}}^2\right)+2\cdot b\cdot\delta\right]+\pi\cdot d_{\text{тр}}\cdot t_{\text{в}}}{t_{\text{р}}^2\cdot t_{\text{в}}} \quad (15)$$

Тогда с учетом (8) и (15) уравнение (9) примет вид:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4\cdot\left[t_{\text{р}}^2\cdot t_{\text{в}}-\delta\cdot\left(b^2-0{,}785\cdot d_{\text{тр}}^2\right)\right]}{2\cdot\left[\left(b^2-0{,}785\cdot d_{\text{тр}}^2\right)+2\cdot b\cdot\delta\right]+\pi\cdot d_{\text{тр}}\cdot t_{\text{в}}} \quad (16)$$

Лопастная насадка на трубах-струнах

Пористость лопастной насадки в поперечном сечении аппарата зависит от геометрии её конструкции.

На рисунке 3 представлена элементарная ячейка лопастной насадки в сечении аппарата с размерами t_pxt_p.

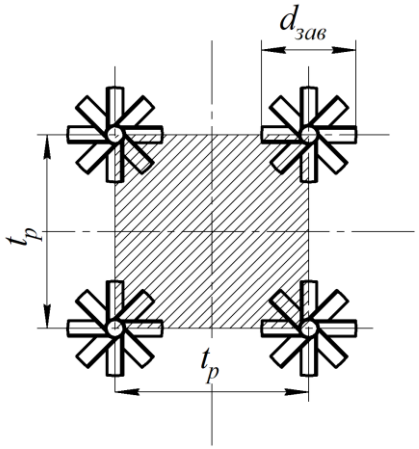


Рисунок 3. Ячейка лопастной насадки в сечении аппарата

Для насадки с наклонными лопастями пористость в поперечном сечении определяется следующим выражением:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{S_{\text{эл}}}{S_{\text{яч}}}, \quad (17)$$

где $S_{\text{эл}}$ – суммарная площадь конструктивных элементов насадки, м^2; $S_{\text{яч}}$- площадь элементарной ячейки насадки, м^2.

Так как основную часть конструкции составляют лопасти, площадь элементов насадки принимается равной площади лопастей:

$$S_{\text{эл}} = S_{\text{лоп}}. \quad (18)$$

Площадь лопастей определяется по формуле:

$$S_{\text{лоп}} = 8 \cdot b \cdot cos \propto \cdot l \,, \tag{19}$$

где b – ширина лопасти, м; l – длина лопасти, м; $\propto$ - угол наклона лопасти.

Площадь ячейки насадки рассчитывается как:

$$S_{\text{яч}} = t_{\text{р}}^2, \tag{20}$$

где $t_{\text{р}}$ – радиальный шаг между осями труб с насадочными элементами. В данной конструкции:

$$t_{\text{р}} = 2 \cdot d_{\text{зав}} \,,$$

где $d_{\text{зав}}$ – диаметр завихрителя, м.

После подстановки выражений (19) и (20) в формулу (17) получим:

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{8 \cdot b \cdot cos \propto \cdot l}{t_{\text{р}}^2} \tag{21}$$

На рисунке 4 показана элементарная ячейка насадки уже в объёме аппарата. Размеры ячейки составляют $t_р$ x $t_р$ x $t_в$, где вертикальный шаг между элементами принимается равным ($t_в = 3{,}5 \cdot d_{зав}$, $d_{зав}$ – диаметр завихрителя, м).

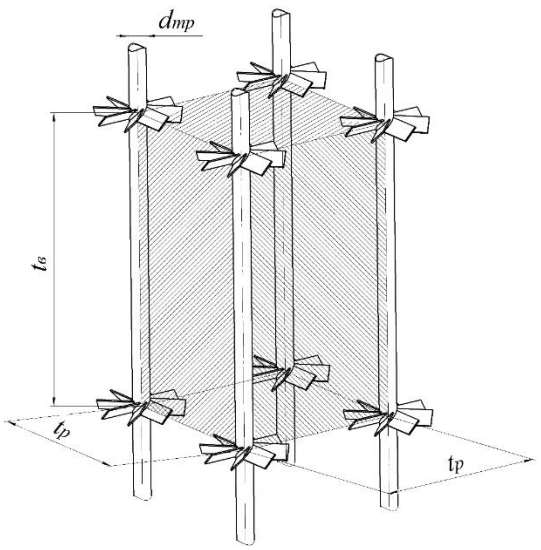


Рисунок 4. Ячейка лопастной насадки в объеме аппарата

Объёмная пористость регулярной лопастной насадки определяется выражением:

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_{эл}}{V_{яч}} \quad (22)$$

Общий объём элементов насадки складывается из объёма трубы и объёма лопастей:

$$V_{эл} = V_{тр} + V_{лоп}. \quad (23)$$

Объём трубы определяется следующим образом:

$$V_{тр} = \frac{\pi \cdot d_{тр}^2}{4} \cdot t_в \quad (24)$$

Объём лопастей рассчитывается по формуле:

$$V_{лоп} = 8 \cdot b \cdot cos \propto \cdot l \cdot \delta_{лоп} \quad (25)$$

Объём элементарной ячейки насадки:

$$V_{яч} = t_р^2 \cdot t_в, \quad (26)$$

где $t_в$ – вертикальный шаг между насадочными элементами.

Подставляя формулы (24) и (25) в уравнение (23), а затем с учетом (26) в уравнение (22), получим:

$$\varepsilon = 1 - \frac{0{,}785 \cdot d_{тр}^2 \cdot t_в + 8 \cdot b \cdot cos\alpha \cdot l \cdot \delta_{лоп}}{t_{тр}^2 \cdot t_в} \quad (27)$$

Эквивалентный диаметр регулярной лопастной насадки определяется по формуле [16]:

$$d_{экв} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_н} \quad (28)$$

Удельная поверхность насадки рассчитывается как отношение площади поверхности элементов к объёму ячейки:

$$a_н = \frac{S_{эл}^н}{V_{яч}} \quad (29)$$

Полная поверхность элементов насадки включает поверхность трубы и поверхность лопастей:

$$S_{эл}^н = S_{тр}^н + S_{лоп}^н \quad (30)$$

Площадь поверхности трубы определяется выражением:

$$S_{\text{тр}}^{\text{н}} = \pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_{\text{в}} \tag{31}$$

Площадь поверхности лопастей:

$$S_{\text{лоп}}^{\text{н}} = 16 \cdot b \cdot l \tag{32}$$

Удельная поверхность насадки с учетом (31) и (32):

$$a_{\text{н}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_{\text{в}} + 16 \cdot b \cdot l}{t_{\text{р}}^2 \cdot t_{\text{в}}} \tag{33}$$

После подстановки выражений (27) и (33) в формулу (28) получим выражение для эквивалентного диаметра насадки:

$$d_{\text{экв}} = \frac{4 \cdot [t_{\text{р}}^2 \cdot t_{\text{в}} - (0{,}785 \cdot d_{\text{тр}}^2 \cdot t_{\text{в}} + 8 \cdot b \cdot cos\alpha \cdot l \cdot \delta_{\text{лоп}})]}{3{,}14 \cdot d_{\text{тр}} \cdot t_{\text{в}} + 16 \cdot b \cdot l} \tag{34}$$

В таблице 1 приведены расчетные данные конструктивных параметров для регулярной пластинчатой насадки на проволочных струнах и регулярной пластинчатой насадки на трубах-струнах.

Таблица 1. Сравнительные характеристики насадок

Расчетные параметры	С регулярной пластинчатой насадкой на проволочных струнах [17]	С регулярной насадкой на трубах-струнах	
		квадратные пластины	лопастные элементы
Порозность в сечении аппарата ε_0, м^2/м^2	0,75	0,758	0,882
Объемная порозность ε, м^3/м^3	0,997	0,997	0,994
Эквивалентный диаметр $d_{\text{экв}}$, м	0,608	0,388	0,66

Полученные расчетные данные показывают, что конструкция насадки оказывает существенное влияние на её гидродинамические характеристики. В частности, лопастная насадка на трубах-струнах характеризуется более высокой порозностью в сечении

аппарата по сравнению с пластинчатой, что свидетельствует о меньшем гидравлическом сопротивлении и более свободном прохождении газового потока.

В то же время уменьшение эквивалентного диаметра для пластинчатой насадки указывает на более развитую поверхность контакта фаз, что потенциально способствует интенсификации процессов тепло- и массообмена. Полученные результаты хорошо согласуются с известными представлениями о влиянии геометрии регулярных насадок на структуру потока и эффективность аппаратов.

Для объективного сравнительного анализа проведем сопоставление расчетных и экспериментальных данных конструктивных и гидродинамических показателей созданных нами аппаратов с регулярной насадкой на трубах-струнах с данными, полученными для нерегулярных и регулярных насадочных элементов и представленными в работах [16,18-20].

В качестве нерегулярной насадки выберем наиболее распространенные в промышленности типы кольцевых насадок: керамические кольца Рашига размером 25×25×3 мм, имеющие удельную поверхность а=200 $м^2/м^3$; объемную порозность ε=0,74 $м^3/м^3$; эквивалентный диаметр $d_{экв}$=0,0148 м, а также металлические кольца Палля размером 25×25×0,6 мм (внутренние лепестки этой насадки существенно увеличивают свободный объем и снижают сопротивление по сравнению со стандартными кольцами Рашига), имеющие удельную поверхность а=235 $м^2/м^3$; объемную порозность ε=0,9 $м^3/м^3$; эквивалентный диаметр $d_{экв}$=0.0153 м [16,18,19].

В качестве регулярной насадки выберем металлическую гофрированную регулярную насадку типа Mellapak 250.Y, имеющую удельную поверхность а=250 $м^2/м^3$; объемную порозность ε=0,96 $м^3/м^3$; эквивалентный диаметр $d_{экв}$=0.01536 м, а также сетчатую рулонную регулярную насадку (часто изготавливается по типу насадки Гудлоу (Goodloe), имеющую удельную поверхность а=500 $м^2/м^3$; объемную порозность ε=0,93 $м^3/м^3$; эквивалентный диаметр $d_{экв}$=0.00744 м [20].

Анализ конструктивных параметров выбранных насадок во многом определяет гидродинамические показатели и интенсивность тепломассообмена. Порозность в сечении определяет истинную скорость газа и локальную гидродинамику. В регулярных насадках она постоянна по высоте, а в нерегулярных (насыпных) — колеблется. Особое значение имеет в пристенной зоне, где порозность в сечении всегда выше, что приводит к «пристенному эффекту» (проскоку газа и байпасированию жидкости) [16,18,19].

Анализ рекомендуемых рабочих скоростей зависит от объемной порозности насадки [16,18-20]. Для колец Рашига из-за малого свободного объема ε=0,74 захлебывание наступает очень рано, и рабочая скорость газа составляет 0,4-0,6 м/с. Для колец Палля объемная порозность ε=0,9 позволяет пропускать больше газа и рабочие скорости составляют 0,6-0,9 м/с. Для сетчатой рулонной (регулярной) насадки при объемной порозности ε=0,93 рабочая скорость газа составляет 0,8-1,2 м/с, а для насадки Mellapak 250.Y при объемной порозности ε=0,96 рабочая скорость – 1,2-1,8 м/с.

Действие разработанных нами аппаратов с регулярной насадкой на трубах-струнах основано на вихревом механизме взаимодействия потоков газа и жидкости. При определенном расположении обтекаемых элементов в вертикальном направлении возможно достижение синфазных режимов взаимодействия вихрей [21], а расположение обтекаемых элементов в радиальном направлении определяет механизм формирования вихрей в зазоре между рядом расположенными элементами [22]. Размеры шагов размещения обтекаемых элементов в вертикальном и радиальном направлении являются значительными, что и определяет высокую объемную порозность насадки из квадратных пластин на трубах-струнах ε=0,997 и насадки с лопастными элементами на трубах-струнах ε=0,988 (таблица 1). При этом для реализации вихревого механизма взаимодействия потоков рабочие скорости составляют 3,5-4,5 м/с. При таких рабочих скоростях диаметр колонных аппаратов является наименьшим из колонн с сравниваемыми насадками.

Эквивалентный диаметр каналов насадки рассчитывается через отношение свободного объема к удельной поверхности насадки. Сопоставление численных значений эквивалентного диаметра сравниваемых насадок показывает, что для реализации вихревого взаимодействия потоков газа и жидкости требуются более высокие значения эквивалентного диаметра. Так, для насадки из квадратных пластин на трубах-струнах $d_{экв}$=0,388 м, а для насадки с лопастными элементами на трубах-струнах $d_{экв}$=0,66 м.

Для дальнейшего анализа влияния конструктивных параметров проведем сравнение по основному энергетическому параметру – гидравлическому сопротивлению колонных аппаратов.

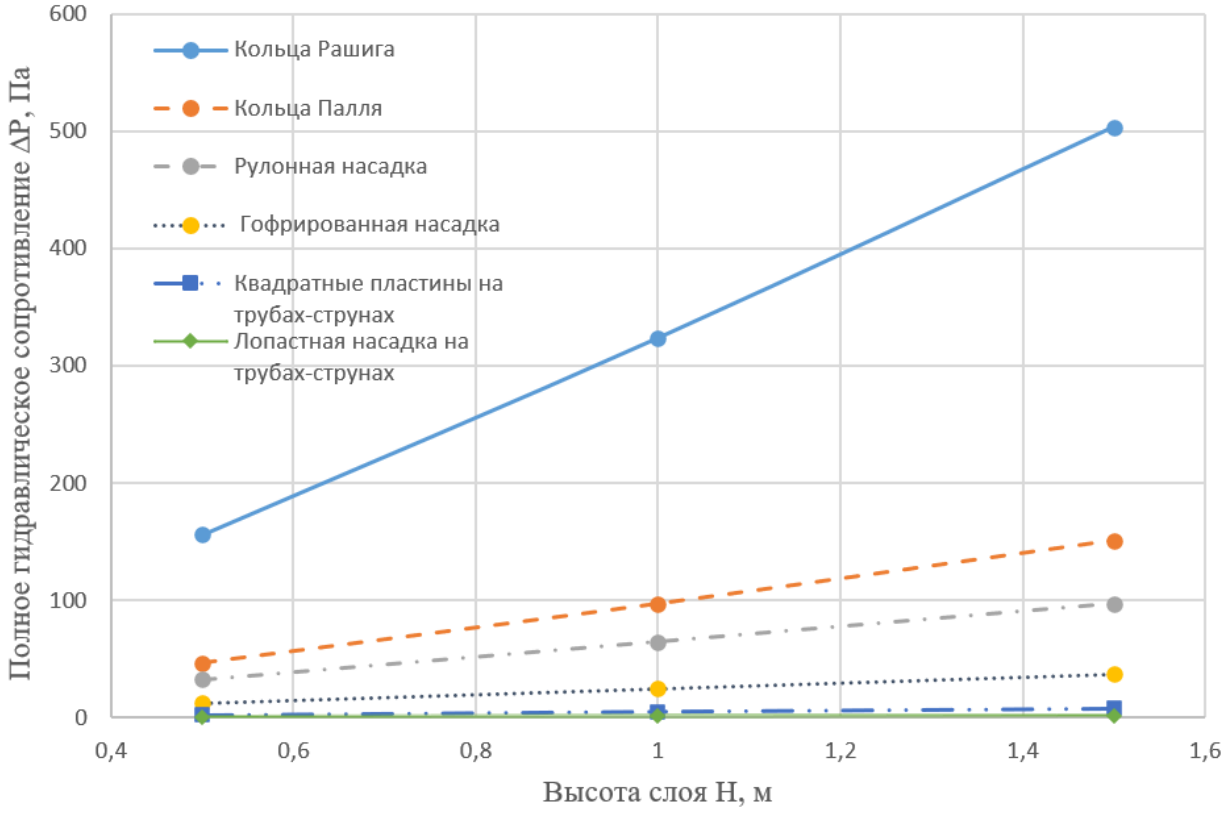
Сравнение гидравлического сопротивления ΔP осуществим для трех размеров высоты насадочной зоны $H_{нас}$ – 0,5 м; 1 м и 1,5 м. В таблице 2 и на рисунке 5 представлены результаты расчетов и экспериментальные данные сравниваемых насадок.

Таблица 2. Гидравлическое сопротивление в зависимости от высоты насадки

Высота слоя насадки Н, м	Гидравлическое сопротивление ΔP, м					
	Кольца Рашига	Кольца Палля	Регулярная гофрированная насадка	Регулярная рулонная насадка	Квадратные пластины на трубах-струнах	Лопастная насадка на трубах-струнах
0,5	156	46,8	12,5	32,5	2,18	0,7
1,0	324	97,2	25,0	65,0	5,36	1,4
1,5	504	151,2	37,5	97,5	8,04	2,1

Как видно из рисунка, наибольшим гидравлическим сопротивлением обладают аппараты с нерегулярной насадкой (кольца Рашига и Палля). При увеличении высоты слоя наблюдаются два негативных эффекта [16,18,19]: первый – эффект уплотнения (деформация), когда нижние слои насадки испытывают значительное статическое давление от веса верхних слоев и задерживающейся в них жидкости. Элементы насадки

внизу колонны могут деформироваться или укладываться плотнее, из-за чего порозность в нижней части падает, а удельное сопротивление растет и, второй – пристеночный эффект. По мере стекания вниз жидкость уходит от центра к стенкам колонны. В зонах у стенок образуются локальные «пробки» из жидкости, локально уменьшающие живое сечение для газа. Газ начинает идти через центр с большей скоростью, что вызывает нелинейный скачок сопротивления всей системы. В аппарате с кольцами Рашига стенки колец являются сплошными, и газ постоянно меняет направление под углами до 90° и более, ударяясь об элементы насадки, и тратит кинетическую энергию на преодоление местных сопротивлений.



Условия опытов: среда вода-воздух; скорость газа $w_г$=0,5м/с

Рисунок 5. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP от высоты насадочной зоны $H_{нас}$

В аппарате с кольцами Палля благодаря вырезам в стенках насадка обладает лучшей аэродинамикой, что снижает сопротивление слоя насадки в сравнении с кольцами Рашига.

В регулярной насадке типа Mellapak 250.Y гофрированные блоки жестко фиксируют геометрию каналов, исключая уплотнение или смещение элементов под весом вышележащих слоев. Жидкость распределяется капиллярными силами и течет в виде строго однородной пленки по гофрам. Благодаря отсутствию хаотичных завихрений и эффекта уплотнения, удельное сопротивление регулярной насадки постоянно по всей высоте слоя, в 3,6 раза ниже колец Палля и в 12 раз ниже колец Рашига [16,18-20].

В регулярной рулонной насадке каналы для прохождения потоков узкие, поэтому базовое удельное сопротивление в них выше, чем у листовой регулярной насадки. При этом оно все равно остается значительно ниже, чем у нерегулярных насадок (колец Рашига и Палля), благодаря упорядоченности и отсутствию тупиковых зон завихрения [20].

Наименьшим гидравлическим сопротивлением при заданных условиях обладают аппараты с регулярной насадкой на трубах-струнах. Это происходит из-за значительного расстояния между гирляндами с насадочными элементами и между их слоями в вертикальном направлении.

Заключение

В данной работе рассмотрены конструкции тепломассообменного аппарата с регулярной насадкой на трубах-струнах. Насадка выполнена в виде пластинчатых и лопастных элементов, закреплённых на трубчатом каркасе. На основе анализа геометрии насадочных элементов и особенностей их размещения предложена расчётная схема элементарной ячейки. Она позволяет учитывать основные конструктивные параметры насадки.

При рассмотрении движения газового потока через каналы, образованные элементами регулярной насадки, были получены зависимости для расчёта порозности в поперечном сечении аппарата, объёмной порозности и эквивалентного диаметра насадки. Полученные выражения учитывают размеры элементов насадки. Также в расчётах учтены радиальные и вертикальные шаги их размещения.

Проведён сравнительный анализ расчётных параметров пластинчатой и лопастной насадок на трубах-струнах. Дополнительно выполнено сопоставление с аналогичной насадкой на проволочных струнах. Установлено, что лопастная насадка имеет более высокую порозность. Это способствует снижению гидравлического сопротивления аппарата. В то же время пластинчатая насадка характеризуется меньшим эквивалентным диаметром. Это указывает на более развитую поверхность контакта фаз и возможность интенсификации процессов тепло- и массообмена.

Проведено сопоставление разработанных насадок и четырех известных типов насадки, используемых в колонных тепломассообменных аппаратах по конструктивным показателям: порозности в сечении и объеме аппарата, эквивалентному диаметру, а также гидравлическому сопротивлению. Сопоставление выполнено с нерегулярными насадками (кольцами Рашига и Палля) и регулярными насадками – металлической гофрированной и сетчатой рулонной. Анализ показал перспективность применения регулярной насадки на трубах-струнах.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых тепломассообменных аппаратов. Кроме того, они могут применяться при модернизации существующих конструкций.

Благодарность, конфликт интересов

Работа выполняется при поддержке грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (проект No AP26199841).

Вклад авторов.

Е.А. Жидебаев: концепция, расчетная методика, написание текста.
О.А. Шохаев: расчетная методика, написание текста.
А.А. Волненко: теоретический анализ, пересмотр текста.
Д.К. Жумадуллаев: анализ конструктивных решений, обсуждение результатов.

Список литературы

1. Волненко А.А., Жумадуллаев Д.К., Корганбаев Б.Н., Сарсенбекулы Д., Ешжанов А.А., Абжапбаров А.А. Тепломассообменные и пылеулавливающие аппараты с регулярной структурой трубчатой насадки. – Шымкент: Южно-Казахстанский университет им. М.О.Ауэзова, 2023. – 164 с.
2. Инновационный патент №27719 Республика Казахстан, МПК B01D 53/20, B01D 47/14. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания/ А.А. Волненко, О.С. Балабеков, Б.Н. Корганбаев, Ж.Е. Хусанов, Н.С. Бекибаев; опубл. 18.12.13, Бюл. №12. – 4 с.
3. Инновационный патент №30217 Республика Казахстан. МПК B01D 53/20, B01D 47/14. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О. С., Сарсенбекулы Д., Жумадуллаев Д.К., Корганбаев Б.Н.; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова. - № 2014/1176.1; заявл. 09.09.14; опубл. 17.08.15, Бюл. №8. – 4 с.
4. Инновационный патент №28151 Республика Казахстан, МПК F28F 1/42. Теплообменная труба / Волненко А.А., Голубев В.Г., Балабеков О.С., Бажиров Т.С., Хусанов Ж.Е., Жумадуллаев Д.К.; заявитель и патентообладатель ЮКГУ им.М.Ауэзова.- №2012/0374.1; заявл. 28.11.12; опубл. 17.02.2014, Бюл.№2.- 4 с.
5. Патент на полезную модель №2092 по заявке №2016/0474.2 от 25.08.2016г. МПК B01D 53/20, 47/14. Приоритет от 9.02.2016. Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Бишимбаев В.К., Волненко А.А., Ескендиров М.З., Протопопов А.В., Жантасов К.Т., Анарбаев А.А. Опубл. 30.03.17, бюл. №6.
6. Патент на полезную модель №3656 Республика Казахстан по заявке №2018/0037.2 от 16.01.2018г. МПК B01D 53/20 (2006/01); B01D 47/14 (2006/1) Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания /Волненко А.А., Ешжанов А.А., Абжапбаров А.А., Ескендиров М.З., Жумадуллаев Д.К. Опубл. 15.02.19, бюл. №7. – 4с.
7. Патент на полезную модель РК №5919 по заявке №2020/1083.2 от 03.12.2020г. МПК B01D 53/20 (2006/01); B01D 47/14 (2006/1). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Корганбаев Б.Н., Исаева А.Н., Джакипбекова Н.О., Жумадуллаев Д.К., Абжапбаров А.А., Камалбек Д.К. Опубл.12.03.2021, бюл. №10.
8. Патент РК № 34418 на изобретение по заявке №2017/0048.1 от 20.01.2017г. МПК B01J 2/04 (2006/1); B01J 19/32 (2006/1). Приоритет установлен 22.06.2018г. №22011 Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания / Волненко А.А., Балабеков О.С., Корганбаев Б.Н., Ескендиров М.З., Жумадуллаев Д.К., Ешжанов А.А., Байгутов Н.Т., Абжапбаров А.А. Бюл. №25 от 26.06.2020 г.
9. Патент РК №35809 по заявке №2021/0372.1 от 18.06.2021г. МПК B01D 53/18(2006.01), 53/00 (2006.01), 47/02(2006.01). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и

пылеулавливания / Волненко А.А., Абжапбаров А.А., Корганбаев Б.Н., Хусанов Ж.Е., Жумадуллаев Д.К., Камалбек Д.К.., Бажибаев Т.Р. Опубл. 26.08.22, бюл. №34.
10. Патент РК №36995 по заявке №2023/0587.1 от 07.09.2023г. МПК B01D 53/20 (2006.01), 47/14(2006.01). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания /Волненко А.А., Шамбилова А.С., Исмаилов Б.Р., Абжапбаров А.А., Корганбаев Б.Н., Нурымбетов Р.А. Опубл. 18.10.24, бюл. №42.
11. Патент РК №36157 по заявке №2022/0046.1 от 27.01.2022г. МПК B01D 47/14(2006.01), 53/00 (2006.01). Аппарат с насадкой для тепломассообмена и пылеулавливания /Волненко А.А., Абжапбаров А.А., Камалбек Д.К., Корганбаев Б.Н., Жумадуллаев Д.К., Бажибаев Т.Р. Опубл. 31.03.23, бюл. №13.
12. Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Slesareva E.Yu. et al. Large-scale maldistributions of local flow parameters at distillation on structured packing // Bulgarian Chemical Communications. – 2020. – Vol. 52. – P. 42–46. https://doi.org/10.34049/bcc.52.F.0007
13. Macfarlan L.H., Phan M.T., Eldridge R.B. Structured packing geometry study for liquid-phase mass transfer and hydrodynamic performance using CFD // Chemical Engineering Science. – 2022. – Vol. 249. – Article 117353. https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117353
14. Amini Y., Nasr Esfahany M. CFD simulation of structured packings: A review // Separation Science and Technology. – 2019. – Vol. 54(15). – P. 2536–2554. https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1549078
15. Zhang Y., Du C., Zhang Z., Du J., Tu Y., Ren Z. Process Intensification of Gas–Liquid Separations Using Packed Beds: A Review // Separations. – 2024. – Vol. 11. – Article 284. https://doi.org/10.3390/separations11100284
16. Рамм В.М. Абсорбция газов. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656с.
17. Волненко А.А. Научные основы разработки и расчета вихревых массообменных и пылеулавливающих аппаратов: дис. … докт. техн. наук. - Шымкент, 1999. - 300с.

E.A. Zhidebayev, O.A. Shokhaev, A.A. Volnenko, D.K. Zhumadullayev

M.Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

Calculation of the Design Parameters of Regular Packing in a Heat and Mass Transfer Apparatus with Pipe-Strings

Abstract. This paper considers the design of a heat and mass transfer apparatus equipped with a regular packing based on pipe-strings. The geometric parameters of the packing elements and their arrangement within the working zone of the apparatus are analyzed. Based on the known principles of gas flow through tortuous channels formed between packing elements, calculation relationships are obtained for determining porosity, volumetric porosity, and equivalent diameter of the apparatus cross-section. The derived equations take into account the geometric characteristics of the packing elements as well as their spacing in vertical and transverse directions. A comparative analysis of calculated parameters is performed for plate-type and blade-type packings mounted on pipe-strings. The results show that blade-type packing is characterized by higher porosity, which contributes to lower hydraulic resistance, whereas plate-type packing provides a higher specific surface area, enhancing the efficiency of heat and mass transfer processes.

Keywords: heat and mass transfer apparatus, regular packing, pipe-strings, plate packing, blade packing, porosity, volumetric porosity, equivalent diameter, specific surface area.

References

1. Volnenko A.A., Zhumadullaev D.K., Korganbaev B.N., Sarsenbekuly D., Eshzhanov A.A., Abzhapbarov A.A. Teplomassoobmennyye i pyleulavlivayushchiye apparaty s regulyarnoy strukturoy trubchatoy nasadki [Heat and mass transfer and dust collection devices with a regular structure of tubular packing]. - Shymkent: South Kazakhstan University named after M.O. Auezov, 2023. - 164 p. [in Russian]
2. Innovative patent No. 27719 Republic of Kazakhstan, IPC B01D 53/20, B01D 47/14. Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with packing for heat and mass transfer and dust collection] / A.A. Volnenko, O.S. Balabaykov, B.N. Korganbaev, Zh.E. Khusanov, N.S. Bekibaev; publ. 18.12.13, Bull. №12. – 4 p. [in Russian]
3. Innovation patent №30217 Republic of Kazakhstan. IPC B01D 53/20, B01D 47/14. Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with packing for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Balabekov O.S., Sarsenbekuly D., Zhumadullaev D.K., Korganbaev B.N.; applicant and patent holder M.Auezov SKSU. - № 2014/1176.1; declared 09.09.14; published 17.08.15, Bulletin №8. – 4 p. [in Russian]
4. Innovative patent No. 28151 Republic of Kazakhstan, IPC F28F 1/42. Teploobmennaya truba [Heat exchange tube] / Volnenko A.A., Golubev V.G., Balabaykov O.S., Bazhirov T.S., Khusanov Zh.E., Zhumadullaev D.K.; applicant and patent holder M.Auezov SKSU. - No. 2012/0374.1; declared. 28.11.12; published. 17.02.2014, Bulletin No. 2. - 4 p. [in Russian]
5. Utility Model Patent No. 2092 for Application No. 2016/0474.2 dated 25.08.2016. IPC B01D 53/20, 47/14. Priority dated 9.02.2016. Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Bishimbayev V.K., Volnenko A.A., Yeskendirov M.Z., Protopopov A.V., Zhantasov K.T., Anarbayev A.A. Published 30.03.17, Bulletin No. 6. [in Russian]
6. Patent for Utility Model No. 3656 of the Republic of Kazakhstan for Application No. 2018/0037.2 dated 16.01.2018. IPC B01D 53/20 (2006/01); B01D 47/14 (2006/1) Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] /Volnenko A.A., Yeshzhanov A.A., Abzhapbarov A.A., Yeskendirov M.Z., Zhumadullaev D.K. Published 15.02.19, Bulletin No. 7. – 4 p. [in Russian]
7. Patent for utility model RK No. 5919 for application No. 2020/1083.2 dated 03.12.2020. IPC B01D 53/20 (2006/01); B01D 47/14 (2006/1). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Korganbaev B.N., Isaeva A.N., Dzhakipbekova N.O., Zhumadullaev D.K., Abzhapbarov A.A., Kamalbek D.K. Published 12.03.2021, Bulletin No. 10. [in Russian]
8. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 34418 for invention based on application No. 2017/0048.1 dated 20.01.2017. IPC B01J 2/04 (2006/1); B01J 19/32 (2006/1). Priority established on 22.06.2018. No. 22011 Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection]/ Volnenko A.A., Balabaykov O.S., Korganbaev B.N., Yeskendirov M.Z., Zhumadullaev D.K., Eshanov A.A., Baigutov N.T., Abzhapbarov A.A. Bull. №25 dated 26.06.2020. [in Russian]
9. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 35809 for application No. 2021/0372.1 dated 18.06.2021. IPC B01D 53/18 (2006.01), 53/00 (2006.01), 47/02 (2006.01). Apparat s

nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Korganbaev B.N., Khusanov Zh.E., Zhumadullaev D.K., Kamalbek D.K., Bazhibaev T.R. Published 26.08.22, Bulletin No. 34. [in Russian]

10. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 36995 for application No. 2023/0587.1 dated 09/07/2023. IPC B01D 53/20 (2006.01), 47/14 (2006.01). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Shambilova A.S., Ismailov B.R., Abzhapbarov A.A., Korganbaev B.N., Nurymbetov R.A. Published 10/18/24, Bulletin No. 42. [in Russian]
11. Patent of the Republic of Kazakhstan No. 36157 for application No. 2022/0046.1 dated 27.01.2022. IPC B01D 47/14 (2006.01), 53/00 (2006.01). Apparat s nasadkoy dlya teplomassoobmena i pyleulavlivaniya [Apparatus with a nozzle for heat and mass transfer and dust collection] / Volnenko A.A., Abzhapbarov A.A., Kamalbek D.K., Korganbaev B.N., Zhumadullaev D.K., Bazhibaev T.R. Published 31.03.23, Bulletin No. 13. [in Russian]
12. Pavlenko A.N., Zhukov V.E., Slesareva E.Yu. et al. Large-scale maldistributions of local flow parameters at distillation on structured packing // Bulgarian Chemical Communications. – 2020. – Vol. 52. – P. 42–46. https://doi.org/10.34049/bcc.52.F.0007
13. Macfarlan L.H., Phan M.T., Eldridge R.B. Structured packing geometry study for liquid-phase mass transfer and hydrodynamic performance using CFD // Chemical Engineering Science. – 2022. – Vol. 249. – Article 117353. https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117353
14. Amini Y., Nasr Esfahany M. CFD simulation of structured packings: A review // Separation Science and Technology. – 2019. – Vol. 54(15). – P. 2536–2554. https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1549078
15. Zhang Y., Du C., Zhang Z., Du J., Tu Y., Ren Z. Process Intensification of Gas–Liquid Separations Using Packed Beds: A Review // Separations. – 2024. – Vol. 11. – Article 284. https://doi.org/10.3390/separations11100284
16. Ramm V.M. Absorbcija gazov. 2-e izd. pererab. i dop. [Absorption of gases. 2nd ed. reworked and additional] – M.: Chemistry, 1976. – 656 p. [in Russian]
17. Volnenko A.A. Nauchnye osnovy razrabotki i rascheta vikhrevykh massoobmennykh i pyleulavlivayushchikh apparatov [Scientific foundations for the development and calculation of vortex mass transfer and dust collection apparatus]: dis. … doctor of technical sciences. – Shymkent, 1999. – 300 p. [in Russian]

Сведения об авторах:

Жидебаев Е.А. – докторант, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана, 5, 160012, Шымкент, Казахстан

Шохаев О.А. – докторант, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана, 5, 160012, Шымкент, Казахстан

Волненко А.А. – доктор технических наук, профессор, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана, 5, 160012, Шымкент, Казахстан

Жумадуллаев Д.К. – автор для корреспонденции, доктор PhD, доцент, Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова, проспект Тауке хана, 5, 160012, Шымкент, Казахстан

Zhidebayev E.A. – Doctoral student, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan

Shokhaev O.A. – Doctoral student, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan
Volenko A.A. – Doctor of Technical Sciences, Professor, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan
Zhumadullayev D.K. – Corresponding author, PhD, Associate Professor, South Kazakhstan University named after M.Auezov, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Обзорная статья https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-193-205

Прогнозирование электрических потерь при эксплуатации машин и оборудования на основе методов искусственного интеллекта

Ж. З. Косыбаев , Б.А. Жакишев , Ә.Т. Мұстафа

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

E mail: zhkossybaev@mail.ru, zhakishev_ba@enu.kz, aset.mustafa@gmail.com

Аннотация. Эксплуатация машин и оборудования требует больших энергетических затрат. В этой связи традиционная энергетика на современном этапе развития требует качественного обновления и глубокой модернизации. В условиях стремительного роста цифровых технологий мы всё чаще становимся свидетелями того, как на смену классическим подходам приходят инновационные цифровые решения. Сегодня, в век цифровизации, наблюдается беспрецедентный рост интереса к технологиям машинного обучения и искусственного интеллекта (ИИ), которые становятся ключевыми инструментами решения сложнейших инженерных задач. Данная статья посвящена одной из наиболее острых проблем современной энергетики – повышению точности прогнозирования технологических потерь электрической энергии в национальной электрической сети Республики Казахстан, находящейся под управлением АО «KEGOC».

В отличие от стандартных алгоритмов, LSTM способна эффективно обрабатывать временные ряды, учитывая долгосрочные зависимости и циклические тренды. Работа включает в себя детальное описание процесса интеллектуальной предобработки данных и сравнительный анализ (бенчмаркинг) моделей LSTM, ARIMA и градиентного бустинга. Результаты показывают, что внедрение ИИ позволяет снизить погрешность до уровня менее 5%, что критически важно для оптимизации режимов работы энергосистемы.

Ключевые слова. прогнозирование электропотребления, электрические потери, искусственный интеллект (ИИ), машинное обучение, глубокое обучение, LSTM**,** нейронные сети, цифровая энергетика.

Received 05.03.2026. Revised 15.09.2026. Accepted 16.09.2026. Available online 30.09.2026

* the correspondence author

Введение

Большие объемы затрат электроэнергии при эксплуатации машин и оборудования сопряжены с переходом к концепции Smart Grid, где ключевую роль играет не только физическая инфраструктура, но и интеллектуальные системы управления данными. В условиях роста цифровых технологий традиционная энергетика сталкивается с вызовами, которые невозможно решить классическими методами. Сегодня искусственный интеллект (ИИ) и машинное обучение перестают быть вспомогательными инструментами, превращаясь в основу для обеспечения надежности и экономической эффективности энергосистем. Казахстан, следуя глобальному тренду цифровизации, интегрирует ИИ-решения для управления сложными нелинейными процессами, к которым относится и прогнозирование потерь [16].

Энергосистема Республики Казахстан в последние годы функционирует в режиме беспрецедентного роста нагрузок. По итогам 2025 года фактическое потребление в Единой электроэнергетической системе (ЕЭС) достигло отметки 124,6 млрд кВт·ч [1]. Особую сложность для системного оператора представляют экстремальные пики: так, 18 декабря 2025 года был зафиксирован исторический максимум нагрузки в 17 724 МВт [2]. Такой интенсивный рост потребления неизбежно ведет к увеличению объемов передачи мощности по магистральным сетям АО «KEGOC», что в физическом выражении означает рост нагрузочных потерь. Такие условия требуют совершенствования методов анализа.

Расчет потерь электрической энергии является важнейшим показателем эффективности работы электрических сетей и традиционно востребован при проектировании, нормировании и управлении режимами этих сетей. Актуальность исследования и совершенствования методик расчета потерь, а также обоснование нормативных характеристик потерь, обусловлена необходимостью повышения точности прогнозов и минимизации экономических потерь. [6]

На сегодняшний день применяются статистические методы прогнозирования потерь электроэнергии, которые включают анализ исторических данных и трендов. Хотя эти методы могут давать неплохие результаты в стабильных условиях, они менее эффективны в условиях высокой изменчивости параметров сети. Традиционные методы расчета потерь характеризуются рядом критических недостатков, ограничивающих их эффективность в современных условиях. Прежде всего, они обладают ограниченной точностью, так как базируются на упрощенных математических моделях, не способных учесть сложные нелинейные зависимости и динамическое влияние внешних факторов. Эта проблема усугубляется высокой зависимостью от теоретических предположений и допущений, которые зачастую не соответствуют реальным режимам работы энергосистемы, что ведет к получению недостоверных результатов. Кроме того, такие подходы отличаются высокой трудоемкостью: процесс требует колоссальных затрат времени и человеческих ресурсов для регулярного сбора, верификации и обновления данных, что делает невозможным оперативное управление сетью в режиме реального времени.

В связи с вышеизложенным, внедрение методов искусственного интеллекта становится не просто инновацией, а производственной необходимостью. Алгоритмы машинного обучения, в частности глубокие нейронные сети, способны выявлять скрытые закономерности в огромных массивах данных (Big Data) [3, 15].

Применение ИИ позволяет значительно ускорить и улучшить процесс анализа данных, что может привести к более точным прогнозам и значительной экономии времени [8]. Выделим основные преимущества использования ИИ.

Объект исследования и структура потерь

Электрические потери в сетях классифицируются на три основные группы [9]:

- Технические потери: обусловлены физикой процесса (нагрев проводов, потери в стали трансформаторов). Они делятся на условно-постоянные и нагрузочные (переменные).
- Расход на собственные нужды: энергия, необходимая для работы оборудования подстанций.
- Коммерческие потери: обусловлены погрешностями приборов учета, хищениями и ошибками в расчетах.

Технологические потери в магистральных сетях имеют сложную физическую природу. Согласно анализу эксплуатационных данных, доминирующую роль играют нагрузочные потери в линиях около 63 % и потери на корону около 20 % (смотреть диаграмму 1).



Диаграмма 1. Структура технологических потерь в магистральных сетях

Если условно-постоянные потери (холостой ход трансформаторов, реакторы) поддаются расчету классическими методами, то переменные составляющие напрямую зависят от метеоусловий и нелинейных изменений нагрузки [10]. Именно для прогнозирования этих динамических параметров наиболее эффективно применение нейросетевых моделей.

Традиционные методы (например, метод средних нагрузок или расчет по схемам замещения) часто не учитывают динамическое изменение метеоусловий и сложные нелинейные связи в транзитных сетях 220–500 кВ. Это создает необходимость перехода к интеллектуальным системам прогнозирования.

Методология

Выбор алгоритма зависит от доступности данных, сложности задачи и требуемой точности. Например, для сложных сетей с большим количеством переменных могут лучше подойти глубокие нейронные сети, а для более простых задач – регрессионные модели **[7]**.

Для данного проекта выбран алгоритм «Рекуррентные нейронные сети», так как глубокие нейронные сети используются при наличии в переменных сложных зависимостей данных и пространственные данные. А в случае прогнозирования потерь планируется использование в основном временных данных, для чего отлично подходит алгоритм «Рекуррентные нейронные сети (RNN)», а точнее «Long Short-Term Memory (LSTM)» **[4]**.

В отличие от стандартных нейронных сетей, LSTM обладает механизмами «памяти», что позволяет ей учитывать:

- суточные и сезонные циклы потребления;
- зависимость текущего состояния сети от предыдущих режимов работы.

В ходе исследования проведен сравнительный анализ алгоритмов (бенчмаркинг) трех подходов к прогнозированию:

- ARIMA (Statistical) – хорошо работает с линейными трендами, но плохо справляется с резкими изменениями нагрузки [14].
- CatBoost (Gradient Boosting) – эффективен для табличных данных, но не учитывает временную последовательность напрямую [13].
- LSTM (RNN) – глубокая нейросеть, способная «запоминать» состояние системы.

Обоснование выбора архитектуры

Для реализации системы прогнозирования была выбрана рекуррентная нейронная сеть архитектуры LSTM (Long Short-Term Memory).

LSTM – это разновидность рекуррентной нейронной сети (RNN), которая особенно хорошо подходит для задач прогнозирования на основе временных рядов, таких как прогнозирование потерь электроэнергии.

Выбор данной модели обусловлен несколькими её уникальными структурными особенностями, позволяющими преодолеть ограничения классических рекуррентных сетей (RNN) и статистических моделей.

Первое – это механизм запоминания. Благодаря наличию специальных «ворот» (gates) – входного, выходного и забывающего – LSTM эффективно решает проблему исчезающих градиентов. Это позволяет модели сохранять и использовать информацию о событиях в отдаленном прошлом, что критически важно для учета сезонных циклов и долгосрочных трендов энергопотребления в сетях АО «KEGOC».

Второе – это моделирование сложных нелинейностей. Энергосистема – это среда, где зависимость потерь от нагрузки, напряжения и метеоусловий носит выраженный нелинейный характер. LSTM обладает высокой аппроксимирующей способностью, позволяющей выявлять эти скрытые закономерности без жесткого задания математических функций [5].

Преимущества модели LSTM

Применение данной архитектуры в контексте прогнозирования технологических потерь позволяет реализовать комплексный аналитический подход.

Модель обучается на расширенном векторе признаков, включающем не только исторические данные о потерях, но и экзогенные переменные: метеорологические параметры (температура, влажность), календарные признаки (день недели, праздники) и операционные данные сети. Это позволяет учитывать, например, нелинейный рост потерь на корону при изменении влажности воздуха.

Архитектура LSTM позволяет одновременно обрабатывать как краткосрочные колебания (почасовые изменения нагрузки), так и долгосрочные зависимости (суточную и сезонную цикличность), что существенно повышает точность прогноза в периоды экстремальных пиковых нагрузок.

Использование LSTM-сетей трансформирует процесс прогнозирования из простой экстраполяции данных в интеллектуальный анализ состояния системы. Мировой опыт внедрения аналогичных решений в ведущих энергокомпаниях (например, REE в Испании или TenneT в Германии) подтверждает, что переход к глубокому обучению позволяет не только снизить операционные затраты за счет оптимизации закупок электроэнергии на покрытие потерь, но и значительно повысить наблюдаемость и надежность управления всей энергетической инфраструктурой [4].

Результаты и обсуждение

Архитектура модели LSTM

Программная реализация выполнена на языке Python. Модель обучалась на реальных исторических данных за многолетний период. Входной вектор формировался на основе скользящего окна глубиной в 90 часов.

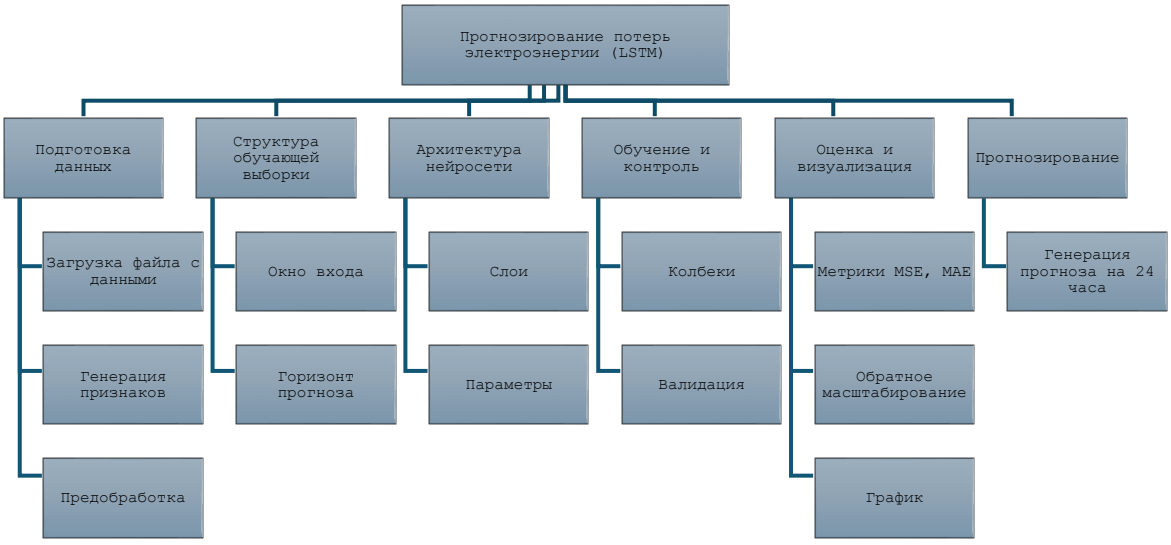


Рисунок 1. Интерактивная модель программы прогнозирования

Процесс включал предобработку данных телеметрии, нормализацию и фильтрацию аномалий, что обеспечило устойчивость алгоритма к «шумам» в данных.

Как показано на рисунке 2 на этапе предобработки программа выполняет парсинг временных меток и преобразование целевого признака файла с данными в числовой формат. На этапе инженерного анализа признаков особое внимание уделено учету долгосрочной периодичности. В модель включены лаговые значения потерь за аналогичные периоды трех предыдущих лет. На этапе формирования обучающей выборки использован метод «скользящего окна» (Sliding Window) с глубиной анализа (look-back) 168 часов для прогнозирования вектора из 24 последующих значений. На этапе конфигурации модели архитектура включает двунаправленный слой Bidirectional LSTM, что позволяет сети учитывать контекст временного ряда в обоих направлениях [11] и слои Dropout для минимизации риска переобучения [12].

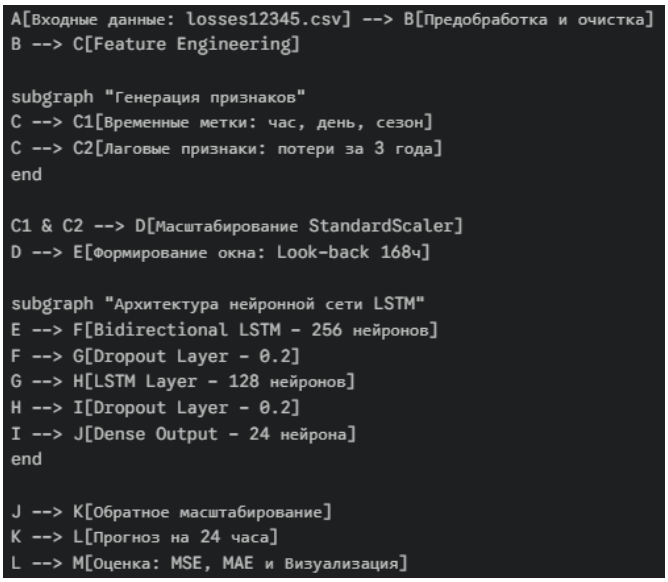


Рисунок 2. Архитектура программного комплекса прогнозирования потерь электроэнергии

Для контроля обучения применены механизмы EarlyStopping и ReduceLROnPlateau, которые автоматически корректируют скорость обучения (learning rate) и останавливают процесс при достижении оптимальных показателей на валидационной выборке.

Результаты тестирования

Разработанная модель прошла тестирование на реальных эксплуатационных данных энергосистемы РК. Модель была протестирована на данных за прошедшие три года (2021–2023 г.г.). Использование фактических почасовых графиков потерь позволило обучить нейросеть учитывать реальные физические процессы в сети.

Качество прогнозов оценивалось с помощью метрик среднеквадратичной ошибки (MSE) и средней абсолютной ошибки (MAE). Для оценки точности нейросетевых моделей в

задачах по прогнозированию числовых значений традиционно используются метрики, позволяющие количественно измерить отклонение прогнозных значений потерь от фактических. В данном исследовании основными индикаторами качества выступили MSE и MAE.

Среднеквадратичная ошибка (MSE) – это метрика акцентирует внимание на крупных отклонениях, возводя разницу в квадрат.

$$MSE = (1/n) * \Sigma (П_i - П'_i)^2,$$

где:

n – количество наблюдений;

Σ – сумма от i=1 до n;

$П_i$ – фактическое значение (реальные потери);

$П'_i$ – предсказание модели (прогноз).

Средняя абсолютная ошибка (MAE) – это метрика, которая показывает среднее линейное отклонение прогноза от реальности в тех же единицах измерения (кВт·ч).

$$MAE = (1/n) * \Sigma | П_i - П'_i |,$$

где:

$П_i - П'_i$ – абсолютное значение (модуль) разности между фактом и прогнозом.

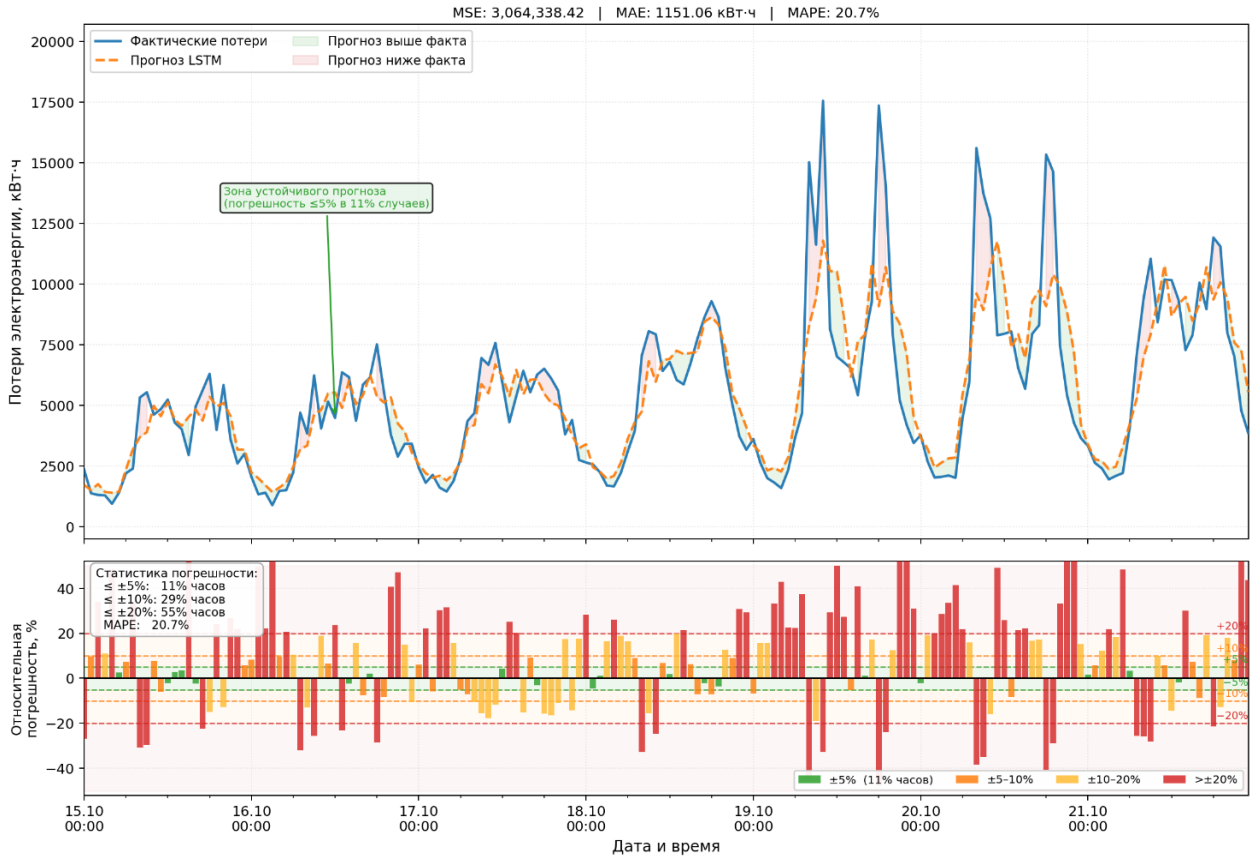


Рисунок 3. Сопоставление фактических и прогнозных значений потерь электроэнергии на тестовом временном интервале

Результаты тестирования показали, что в периоды устойчивых режимов работы сети предложенная LSTM-архитектура обеспечивает высокую точность прогнозирования с относительной погрешностью менее 5%. Как видно из Рисунка 3, модель наиболее точно предсказывает потери в периоды стабильных температурных режимов. В периоды резких пиков нагрузки отклонения возрастают, что объясняется
недостаточной представленностью экстремальных режимов в обучающей выборке и требует дополнительного дообучения модели на экстремальных погодных сценариях.

Преимущества метода

Традиционный расчет потерь по методикам средних нагрузок требует сбора данных из множества систем учета и их ручной сверки. Автоматизированная модель сокращает время подготовки расчетов до считанных минут. Кроме этого, ручные расчеты подвержены ошибкам на основе человеческих факторов, особенно в условиях стресса или высокой загрузки инженеров. Модель ИИ одинаково эффективно и быстро обрабатывает данные в любое время, исключая ошибки ручной работы. Точность прогнозирования также может влиять на финансовые показатели электросетевых компаний в условиях функционирования рынка электроэнергии. Более точный прогноз позволяет закупать электроэнергию на покрытие технологических потерь по наиболее выгодным тарифам, минимизируя значительные отклонения.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает, что переход от традиционных статистических методов к алгоритмам глубокого обучения, в частности к архитектуре LSTM, является наиболее перспективным вектором развития для национальной электрической сети Республики Казахстан. Интеграция методов машинного обучения с реальными инженерными данными АО «KEGOC» открывает новые горизонты для цифровой трансформации электроэнергетики, позволяя преодолеть ограничения классических математических моделей в условиях высокой волатильности нагрузок и климатических факторов. В ходе работы была доказана высокая эффективность нейросетевого подхода: предложенная методика позволила снизить погрешность прогнозирования технологических потерь в периоды устойчивых режимов работы сети до уровня менее 5%. Это стало возможным благодаря способности рекуррентных сетей учитывать долгосрочные зависимости во временных рядах, а также успешной предварительной обработке данных, включая нормализацию и фильтрацию аномалий. Сравнительный анализ (бенчмаркинг) наглядно продемонстрировал превосходство LSTM над аналогичными моделями в контексте инерционных процессов энергосистемы. Разработанный инструментарий позволяет глубже понимать внутренние нелинейные закономерности поведения сложных систем и служит надежным фундаментом для создания интеллектуальных систем нового поколения. Самостоятельная программная реализация модели на языке Python и её успешная апробация доказывают готовность

отечественной инженерной практики к внедрению высокотехнологичных ИИ-решений.

Совокупный эффект от внедрения данных решений создает синергию: автоматизация высвобождает время квалифицированного персонала для принятия стратегических решений, точность прогноза минимизирует прямые финансовые убытки, а масштабируемость гарантирует, что инвестиции в разработку ИИ будут приносить пользу на протяжении десятилетий, независимо от роста или трансформации энергосистемы Республики Казахстан. Перспективным направлением дальнейшего развития исследования является использование полученных прогнозов не только для повышения точности определения объемов технологических потерь, но и для последующей оптимизации режимов работы электрической сети. Более точное прогнозирование величины потерь создает информационную основу для принятия обоснованных эксплуатационных и организационных решений, направленных на снижение дополнительных финансовых затрат, связанных с их покрытием.

Вклад авторов

Косыбаев Ж.З.: разработка концепции и дизайна исследования; научное руководство; обеспечение методологической базы, критический пересмотр текста на предмет принципиального интеллектуального содержания; утверждение окончательного варианта статьи.

Жакишев Б.А.: обеспечение методологической базы, проведение экспериментальных исследований (сбор данных); статистическая обработка и анализ результатов; подготовка начального варианта рукописи.

Мұстафа Ә.Т.: разработка концепции, проведение экспериментальных исследований (сбор данных); статистическая обработка и анализ результатов; подготовка начального варианта рукописи; оформление графического материала и библиографического списка, визуализация данных.

Список литературы

1. Министерство энергетики РК. Итоги работы топливно-энергетического комплекса за 2025 год. – Астана, 2026.
2. АО «KEGOC». Аналитический отчет о работе Единой электроэнергетической системы Казахстана. [Электронный ресурс].
3. Nature Scientific Reports. Deep learning for electricity loss forecasting using LSTM networks. - 2023. - Vol. 13.
4. S&P Global Research. Energizing innovation: Exploring AI’s impact on the energy industry. - 2024. https://www.spglobal.com/en/research-insights/special-reports/look-forward/energizing-innovation-exploring-ai-s-impact-on-the-energy-industry
5. Sepp Hochreiter & Jürgen Schmidhuber (1997) - «Long Short-Term Memory». https://www.bioinf.jku.at/publications/older/2604.pdf

6. Sudić I., Mesar M., Franc B., Capuder T., Ivanković T., Pavić K., Pavić I. Short-Term Transmission System Losses Forecast Based on Supervised Machine Learning // IEEE Conference Publication. – 2020.
7. Манусов В.З., Заиграева Ю.Б. Модель прогнозирования потерь мощности в высоковольтных электрических сетях на основе искусственных нейронных сетей // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск, 2008. – № 1(30). – С. 131–146.
8. Курбацкий В.Г., Томин Н.В. Анализ потерь электрической энергии на базе современных алгоритмов искусственного интеллекта // Электричество. – 2007. – № 4. – С. 5–12.
9. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 280 с.
10. Navani J.P., Sharma N.K., Sapra S. Technical and non-technical losses in power system and its economic consequence in Indian economy // International Journal of Electronics and Computer Science Engineering. – 2016. – Vol. 1, № 2. – P. 757–761.
11. Schuster M., Paliwal K.K. Bidirectional recurrent neural networks // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1997. – Vol. 45, № 11. – P. 2673–2681.
12. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting // Journal of Machine Learning Research. – 2014. – Vol. 15, № 56. – P. 1929–1958.
13. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A.V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems 31 (NeurIPS 2018). – 2018. – P. 6639–6649.
14. Elsaraiti M., Ali G., Musbah H., Merabet A., Little T. Time series analysis of electricity consumption forecasting using ARIMA model // 2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech). – 2021. – P. 259–262.
15. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. – 2015. – Vol. 521, № 7553. – P. 436–444.
16. Balamurugan M., Narayanan K., Raghu N., Arjun Kumar G.B., Trupti V.N. Role of artificial intelligence in smart grid – a mini review // Frontiers in Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 8. – Art. 1551661.

Zh. Kossybayev, B. Zhakishev, A. Mustafa

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Forecasting electrical losses during the operation of machinery and equipment using artificial intelligence methods

Abstract. The operation of machinery and equipment entails high energy consumption. In this context, the traditional energy sector requires qualitative renewal and extensive modernization at

the current stage of development. In the current era of digitalization, there is an unprecedented surge of interest in machine learning and artificial intelligence (AI) technologies, which are becoming key tools for solving complex engineering problems. This article addresses one of the most pressing issues in modern power engineering: improving the accuracy of forecasting power transmission losses in the national power grid of the Republic of Kazakhstan, managed by JSC "KEGOC". Traditional statistical calculation methods used in current practice often exhibit significant margins of error. This is due to the inability of classical models to fully account for non-linear dependencies, dynamic changes in meteorological conditions, and the complex nature of load processes in high-voltage networks. As an innovative solution, the article proposes a methodology based on the use of recurrent neural networks with Long Short-Term Memory (LSTM) architecture. Unlike standard algorithms, LSTM is capable of effectively processing time series by considering long-term dependencies and cyclic trends. The work includes a detailed description of the intelligent data preprocessing stage and a comparative analysis (benchmarking) of LSTM, ARIMA, and gradient boosting models. The results demonstrate that the implementation of AI reduces the forecasting error to less than 5%, which is critical for optimizing the operating modes of the power system.

Keywords: power consumption forecasting, electrical losses, artificial intelligence (AI), machine learning, deep learning, LSTM, neural networks, digital energy.

References

1. Ministerstvo energetiki RK. Itogi raboty toplivno-energeticheskogo kompleksa za 2025 god. – Astana, 2026.
2. AO «KEGOC». Analiticheskii otchet o rabote Edinoi elektroenergeticheskoi sistemi Kazahstana. [Elektronnyi resurs].
3. Nature Scientific Reports. Deep learning for electricity loss forecasting using LSTM networks. - 2023. - Vol. 13.
4. S&P Global Research. Energizing innovation: Exploring AI’s impact on the energy industry. - 2024. https://www.spglobal.com/en/research-insights/special-reports/look-forward/energizing-innovation-exploring-ai-s-impact-on-the-energy-industry
5. Sepp Hochreiter & Jürgen Schmidhuber (1997) - «Long Short-Term Memory». https://www.bioinf.jku.at/publications/older/2604.pdf
6. Sudić I., Mesar M., Franc B., Capuder T., Ivanković T., Pavić K., Pavić I. Short-Term Transmission System Losses Forecast Based on Supervised Machine Learning // IEEE Conference Publication. – 2020.
7. Manusov V.Z., Zaigraeva Yu.B. Model' prognozirovaniya poter' moshchnosti v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh na osnove iskusstvennykh neironnykh setei // Nauchnyi vestnik NGTU. – Novosibirsk, 2008. – No. 1(30). – P. 131–146.
8. Kurbatskii V.G., Tomin N.V. Analiz poter' elektricheskoi energii na baze sovremennykh algoritmov iskusstvennogo intellekta // Elektrichestvo. – 2007. – No. 4. – P. 5–12.
9. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov. –

Moscow: Izd-vo NTs ENAS, 2002. – 280 p. 10–16.
10. Navani J.P., Sharma N.K., Sapra S. Technical and non-technical losses in power system and its economic consequence in Indian economy // International Journal of Electronics and Computer Science Engineering. – 2016. – Vol. 1, № 2. – P. 757–761.
11. Schuster M., Paliwal K.K. Bidirectional recurrent neural networks // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1997. – Vol. 45, № 11. – P. 2673–2681.
12. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., Sutskever I., Salakhutdinov R. Dropout: A Simple Way to Prevent Neural Networks from Overfitting // Journal of Machine Learning Research. – 2014. – Vol. 15, № 56. – P. 1929–1958.
13. Prokhorenkova L., Gusev G., Vorobev A., Dorogush A.V., Gulin A. CatBoost: unbiased boosting with categorical features // Advances in Neural Information Processing Systems 31 (NeurIPS 2018). – 2018. – P. 6639–6649.
14. Elsaraiti M., Ali G., Musbah H., Merabet A., Little T. Time series analysis of electricity consumption forecasting using ARIMA model // 2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech). – 2021. – P. 259–262.
15. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning // Nature. – 2015. – Vol. 521, № 7553. – P. 436–444.
16. Balamurugan M., Narayanan K., Raghu N., Arjun Kumar G.B., Trupti V.N. Role of artificial intelligence in smart grid – a mini review // Frontiers in Artificial Intelligence. – 2025. – Vol. 8. – Art. 1551661.

Информация об авторах:

Косыбаев Ж.З**.** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры электроэнергетики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, К. Сатпаева

Жакишев Б.А. – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева

Мұстафа Ә.Т. **–** автор для корреспонденции, магистрант кафедры электроэнергетики, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, К. Сатпаева, 2

Kosybayev Zh.Z. – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Department of "Electric Power Engineering", L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St

Zhakishev B.A. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of "Electric Power Engineering", L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St

Mustafa A.T. – corresponding author, Master's student, Department of "Electric Power Engineering", L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Научная статья https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-206-221

Экспериментальные исследования симулятора землетрясения на основе тросового параллельного робота

А.А.Джомартов* , **А.Е.Абдураимов** , **А.Н.Камал**

Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан

E mail: [1]legsert@mail.ru, [2]zizo_waterpolo@mail.ru, [3]kan77705@gmail.com

Аннотация. В настоящее время в мире большое внимание уделяется проектированию симуляторов землетрясения. Симулятор землетрясения - устройство воспроизведения сейсмических волн, возникающих при землетрясении. В работе проводятся экспериментальные исследования симулятора землетрясения на основе тросового параллельного робота (ТПР), для воспроизведения трехмерного, движения грунта при землетрясении, согласно заданной сейсмограммы. Экспериментальные исследования проводились на прототипе симулятора землетрясения на основе ТПР, изготовленного в ИММаш им. У.А. Джолдасбекова. Прототип симулятора землетрясения имеет две подвижных платформы. Мобильная платформа прототипа симулятора землетрясения совершает поступательные движения в направлении осей X и У за счет применения ТПР, а вертикальное поступательное движение платформы по оси Z совершается приводом с кулачковым механизмом. Проведены экспериментальные исследования прототипа симулятора землетрясения, для определения возможности воспроизведения заданной сейсмограммы землетрясении. Проведены экспериментальные исследования прототипа симулятора землетрясения с участием человека, которые показали эффект ощущения реального землетрясения. С помощью датчика IMU были сняты показания параметров ускорения и углов отклонения головы человека при положениях сидя и стоя. Из анализа полученных результатов проведенных испытаний симулятора землетрясения, были выданы рекомендации поведения людей при сильном землетрясении.

Ключевые слова: тросовый параллельный робот, симулятор землетрясения, сейсмограмма, прототип, датчик IMU

Received 22.10.2025. Revised 15.09.2026. Accepted 16.09.2026. Available online 30.09.2026

* the corresponding author

Введение

Землетрясения происходят неожиданно и производят катастрофические разрушения. После 10-20 секунд колебаний грунта, подземные толчки усиливаются, что приводит к разрушению зданий и сооружений. В связи с тем, что землетрясение не может быть предсказано, большое значение имеет моделирование землетрясений при помощи симуляторов землетрясения. Симулятор землетрясения предназначен для воспроизведения сейсмических волн, возникающих при землетрясении. Симуляторы землетрясений помогают воспроизвести реальные сейсмические волны прошлых землетрясений. Тренировки на симуляторах землетрясений помогают выработать эффективную реакцию у людей на землетрясения. Основное требование к симулятору землетрясения это воспроизведение заданной сейсмограммы землетрясения (Рис. 1) по трем декартовым осям. Для примера, на рисунке 1 показана сейсмограмма основания дома, при землетрясении 1964 года в городе Ниигата (Япония) [1].

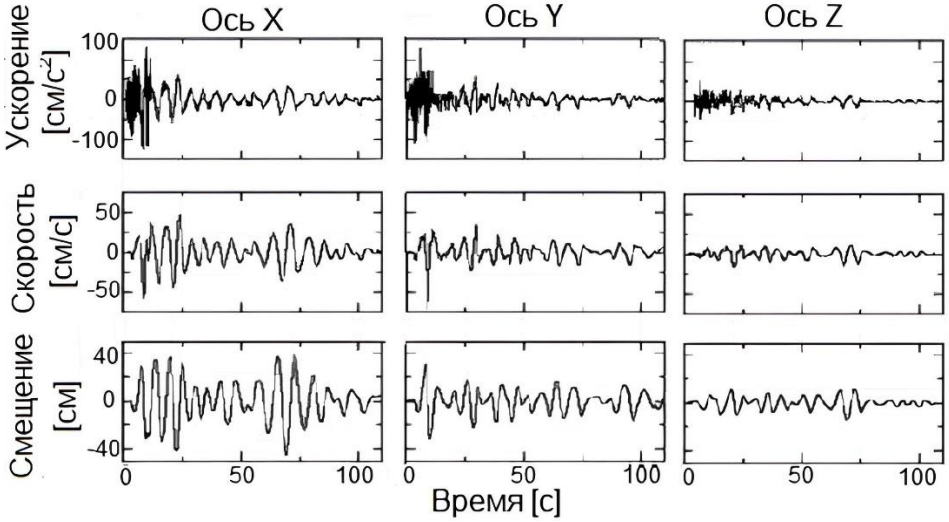


Рисунок 1. Сейсмограмма основания дома, при землетрясении 1964 года в городе Ниигата (Япония) [1]

Разработаны различные виды симуляторов землетрясений для воспроизведения сейсмических волн. В Японии был построен большой симулятор землетрясения E-Defense [2] для воспроизведения различных сейсмических волн с высокой точностью. Симулятор землетрясения E-Defense имеет движущуюся платформу размером 20 х 15 м, с 14 гидравлическими приводами, поэтому не может транспортироваться. В работе [3] представлен портативный симулятор землетрясения Jishin-The-Vuton 3D, который реализует движение вверх и вниз для имитации трехмерного движения грунта при землетрясении. Недостатком симулятора Jishin-The-Vuton 3D является склонность к опрокидыванию из-за небольшой площади контакта приводной системы с сидящим на нем человеком. Разработан симулятор землетрясения [4] с вибрирующей платформой, которая установлена на раме. Платформа приводится в возвратно-поступательное движение гидравлическим приводом, через систему рычагов. Недостатком данного симулятора землетрясения является сложность конструкции и управления из-за наличия гидроприводов, невозможность воспроизведения больших ускорений, низкая транспортабельность, непригодность для проведения сейсмических тренировок людей.

Разработан симулятор землетрясения на базе пространственного параллельного механизма 4-RPS (Range Positioning System) [5], и установлен на грузовой машине. Симулятор землетрясений является мобильным, простым по конструкции, гибким и точным в управлении, и может широко использоваться для научной популяризации исследований землетрясений в школах и населенных пунктах. В работе [6] был построен симулятор землетрясения на основе плоского параллельного тросового механизма. Кроме того, он обладает простотой сборки и разборки и высокую транспортируемость. Недостатком данного симулятора землетрясения является сложность и дороговизна конструкции из-за наличия воздушных подшипников, нестабильная работа которых вызывает проблемы с устойчивостью платформы.

Для устранения вышеуказанных недостатков симуляторов землетрясения в ИММаш им. У.А. Джолдасбекова был разработан и изготовлен симулятор землетрясения для воспроизведения трехмерного движения грунта, согласно сейсмограмме землетрясения [7]. Подвижная платформа симулятора землетрясения совершает поступательные движения в направлении осей X или У, при помощи ТПР. ТПР имеют меньшие инерционные характеристики, что обеспечивает высокую скорость и ускорение [8–13].

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований прототипа симулятора землетрясения, для определения возможности воспроизведения заданной сейсмограммы землетрясении и проведение испытаний с участием человека.

Методология

Конструкция симулятора землетрясения на основе ТПР. На рисунке 2 показана конструктивная схема симулятора землетрясения для воспроизведения трехмерного движения грунта при землетрясении. Для воспроизведения поступательного движения подвижной платформы по осям X и У, применяется ТПР с 4-я тросами управляемых серводвигателями) Подвижная платформа совершает плоские движения по полу на девяти шаровых стальных колесах. Для воспроизведения вертикального поступательного движения по оси Z, на подвижную платформу устанавливаем вертикальную подвижную платформу. Вертикальная подвижная платформа перемещается по оси Z при помощи привода состоящий из кулачкового механизма с поступательно двигающимся горизонтально кулачком и поступательно двигающимся вертикально толкателем. Для проведения испытаний, объект или человек располагаются на вертикальной подвижной платформе.

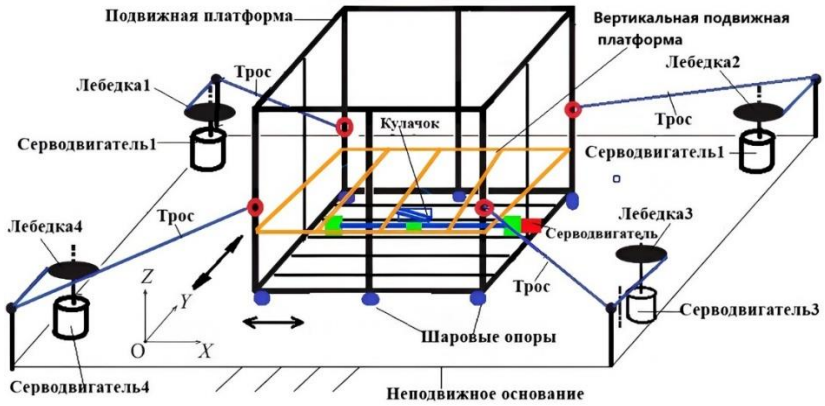


Рисунок 2. Конструктивная схема симулятора землетрясения на основе ТПР

Для воспроизведения заданной сейсмограммы симулятор землетрясения работает следующим образом. Компьютер, при помощи специально разработанной программы, выдает сигналы для управления на контроллер серводвигателей. Серводвигатели начинают натягивать тросы, путем наматывания и разматывания на барабаны лебедок, осуществляя перемещение платформы горизонтально по осям X, У. Для осуществления вертикального перемещения платформы, включаются серводвигатель привода кулачкового механизма.

Кинематика ТПР. Рассмотрим кинематику 4-х тросового ТПР, где мобильная платформа совершает поступательные движения в направлении осей X и У. Кинематическая схема ТПР с четырьмя тросами показана на рисунке 3. Основание определяется четырьмя точками приводов тросов $A_i, i = 1, \dots, 4$. Глобальная система координат $\{XYZ\}$ установлена в центре основания. Локальная система координат $\{xyz\}$ находится в геометрическом центре P прямоугольной платформы с вершинами в точках соединения тросов $B_i, i = 1, \dots, 4$.

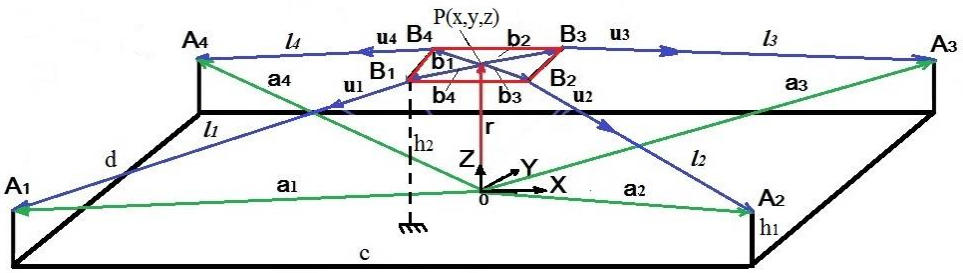


Рисунок 3. Кинематическая схема ТПР

На рисунке 3 введены обозначения: $\mathbf{a_i}$ - векторы положения точек A_i прикрепленных к неподвижной раме относительно главной системы координат {XYZ}. Локальная система координат $\{xyz\}$ находится в геометрическом центре P квадратной платформы с вершинами в точках соединения тросов $B_i, i = 1, \dots, 4$ и $\mathbf{b_i}$ - векторы положения точек B_i, $\mathbf{l_i}$ - вектор длины тросов относительно главной системы координат XYZ. Размеры неподвижной прямоугольной рамы ТПР: c - ширина, d – длина. Размеры подвижной квадратной платформы ТПР: dp –длина стороны. В кинематической схеме ТПР, предполагается, что тросы прямолинейные и натянутые. Кроме того, предполагается, что вектора a_i и b_i не зависят от позиции мобильной платформы, т.е. влияние возможных направляющих шкивов или элементов крепления на платформу не учитывается.

Применяя метод замкнутых векторных контуров (рисунок 3), получим следующую систему уравнений

$$a_i - r - b_i - l_i = 0 \qquad i = 1, \dots, 4 \tag{1}$$

где вектор $r = [x, y, z]^T \in \mathbb{R}^3$ - декартово положение центра мобильной платформы, относительно глобальной системы координат $O(XYZ)$. Здесь координата $z = h_2$ является постоянной и равна высоте закрепления тросов относительно основания

Уравнения (1) можно записать в виде

$$\mathrm{l}_i = \mathrm{a}_i - \mathrm{r} - \mathrm{b}_i \quad i = 1, \ldots, \tag{2}$$

и единичный вектор u_i вдоль троса имеет вид

$$\mathrm{u}_i = \frac{\mathrm{l}_i}{\|\mathrm{l}_i\|_2} = \frac{\mathrm{l}_{xi}, \mathrm{l}_{yi}, \mathrm{l}_{zi}}{\sqrt{\mathrm{l}_{xi}^2 + \mathrm{l}_{yi}^2 + \mathrm{l}_{zi}^2}} \; i = 1, \ldots, 4 \tag{3}$$

Единичный вектор u_i по соглашению направлен от мобильной платформы к неподвижному основанию, это значит, что положительные силы направлены в направлении, которое укорачивает тросы и тем самым уменьшает значение связанной с ней обобщенной координаты l_i.

Координаты вектора a_i, относительно главной системы координат XYZ, приведены в таблице 1

Таблица 1. Координаты вектора $\boldsymbol{a_i}$

Трос *i*	Вектор a_i		
	x	*y*	*z*
1	-c/2	-d/2	h_1
2	c/2	-d/2	h_1
3	c/2	d/2	h_1
4	-c/2	d/2	h_1

Координаты вектора b_i, относительно локальной системы координат xyz, приведены в таблице 2

Таблица 2. Координаты вектора $\boldsymbol{b_i}$

Трос *i*	Вектор b_i		
	x	*y*	*z*
1	$-dp/2$	$-dp/2$	h_2
2	$dp/2$	$-dp/2$	h_2
3	$dp/2$	$dp/2$	h_2
4	$-dp/2$	$dp/2$	h_2

Для решения прямой задачи кинематики ТПР, из уравнения (1) получаем 4 нелинейных уравнений прямой кинематики, которые образуют систему с избыточными связями

$$\Delta_i(\mathrm{l}, \mathrm{r}) = \|\mathrm{a}_i - r - \mathrm{b}_i\|_2^2 - l_i^2 = 0 \quad i = 1, \ldots, 4 \tag{4}$$

Тросы рассматриваются, как линейные пружины. В общем, мы не можем ожидать точного решения вышеупомянутых уравнений, но мы можем минимизировать ошибку, которую можно интерпретировать как минимизацию потенциальной энергии в предварительно натянутых тросах. Пусть U - потенциальная энергия системы

$$U = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{4} k_i \Delta_i^2 \tag{5}$$

где k_i - жесткость *i*-го троса. Мы предполагаем, что все тросы имеют одинаковую жесткость k_i. Тогда минимум потенциальной энергии U системы не зависит от конкретного

значения жесткости k_i и функцию прямой кинематики можно определить из оптимизационной задачи [13]

$$\mathrm{P(l)} = \min_{\mathrm{r}} \sum_{i=1}^{4} \Delta_i^2(\mathrm{l}, \mathrm{r}) \quad (6)$$

где вектор $\mathrm{l} = [l_1, l_2, l_3, l_4]^{\mathrm{T}}$ это заданные длины тросов. Функция P(l) дает значения $r = [x, y, z]^{\mathrm{T}}$ обеспечивающие минимум уравнения (6).

Привод вертикальной подвижной платформы симулятора землетрясения. Для того чтобы симулятор землетрясений воспроизвел заданную сейсмограмму землетрясения вдоль оси Z (см. Рисунок 1), необходимо обеспечить поступательное движение вертикальной подвижной платформы. Для обеспечения движения вертикальной подвижной платформы используются кулачковый механизм с поступательно двигающимся горизонтально кулачком и поступательно двигающимся вертикально толкателем. Кулачок крепится к направляющей линейного актуатора с шариковой винтовой передачей. К толкателю крепится подвижная платформа.

Для обеспечения движения вертикальной подвижной платформы используются привод (см. рисунок 4), состоящий из кулачкового механизма с поступательно двигающимся горизонтально кулачком и поступательно двигающимся вертикально толкателем. Кулачок крепится к направляющей шариковой винтовой передачи, соединенной через муфту с шаговым двигателем. К толкателю крепится вертикальная подвижная платформа.

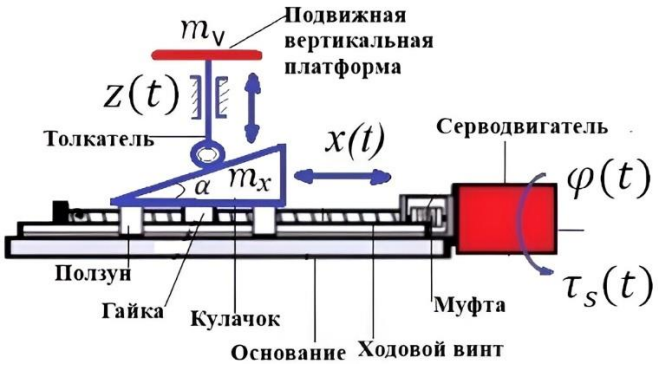


Рисунок 4. Привод для подъема вертикальной подвижной платформы

Зависимость хода кулачка *x(t)* от угла поворота винта *φ(t)* определяется формулой

$$x(t) = h_s \frac{\varphi(t)}{2\pi}, \quad (7)$$

где h_s - шаг винта.

Линейная скорость толкателя $\dot{z}(t)$ определяется по формуле

$$\dot{x}(t) = h_s \frac{\omega(t)}{2\pi}, \quad (8)$$

где $\omega(t) = \dot{\varphi}(t)$ – угловая скорость серводвигателя.

Профиль кулачка выполнен в виде клина, с углом наклона $\propto$, тогда ход толкателя (подвижной платформы) определяется по формуле

$$z(t) = x(t)tg \propto \quad (9)$$

Скорость подвижной платформы

$$\dot{z}(t) = \dot{x}(t)\ tg \propto \quad (10)$$

Подставляя (8) в (10) получим

$$\dot{z}(t) = h_s \frac{\omega(t)}{2\pi}\ tg \propto \quad (11)$$

Передаточное отношение винтовой передачи равно $i_s = \frac{\mathrm{h_s}}{2\pi}$

Крутящий момент $\tau_s(t)$ серводвигателя определяется по формуле

$$\tau_s(t) = \frac{m(\ddot{z}(t)+g)}{i_s} \quad (12)$$

Значение ускорения подвижной платформы $\ddot{z}(t)$ берем из графика ускорения сейсмограммы землетрясения

$$m = m_x + m_V$$

где масса m_x – масса направляющей и кулачка, m_V – масса вертикальной подвижной платформы с грузом

Прототип симулятора землетрясения на основе ТПР. В лаборатории ИММаш им. У.А. Джолдасбекова был изготовлен прототип симулятора землетрясения, проектно-конструкторская документации (ПКД), которого приведена в [14]. Прототип симулятора землетрясения состоит из ТПР (см. Рисунок 5) с четырьмя тросами марки Dyneema, LIROS D-Pro 01505-0200 и диаметром 3 мм. Каждый трос приводится в движение приводом. Привод состоит из сервомотора переменного тока мощностью 600 Вт, который через планетарный редуктор с передаточным отношением 1: 10 соединен с лебедкой, Приводы установлены на полу, в углах квадрата размерами 2,7 х 2,7 м. Тросы ТПР прикреплены, через датчики силы S Type Load Cells DYLY-101 [15], к мобильной платформе, размерами 0,8 х 0,8 х 0,8 м. Движение вертикальной подвижной платформы осуществляется кулачковым механизмом с поступательно двигающимся горизонтально кулачком и поступательно двигающимся вертикально толкателем к которой крепится вертикальная подвижная платформа. Кулачок крепится к направляющей шариковой винтовой передачи, соединенной через муфту с серводвигателем.

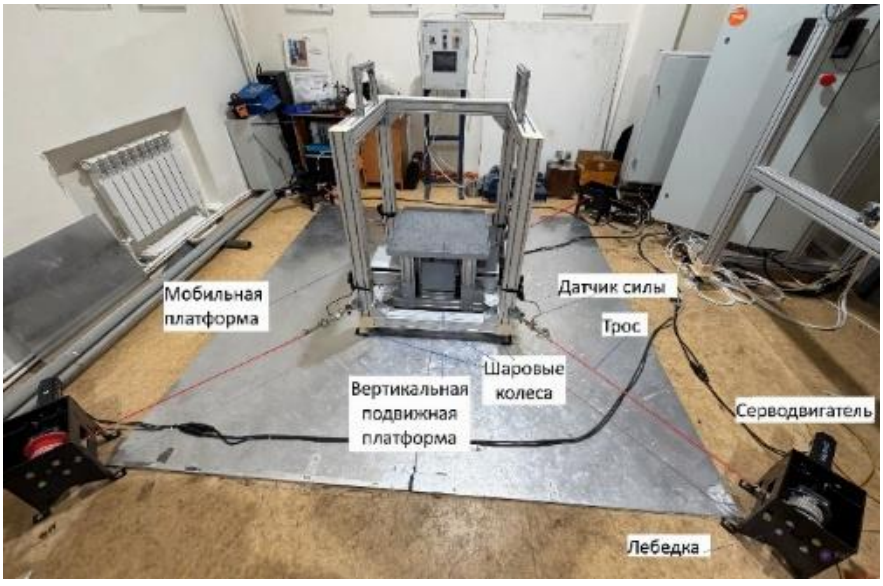


Рисунок 5. Прототип симулятора землетрясения

На рисунке 6 показан интерфейс программы для управления прототипом симулятора землетрясения

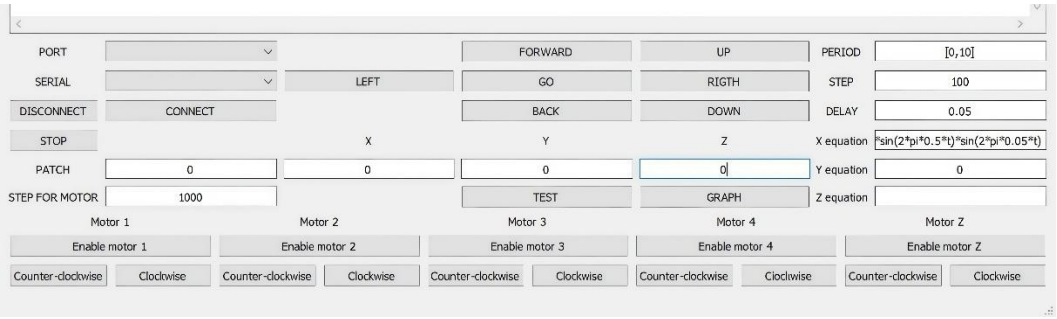


Рисунок 6. Интерфейс программы для управления прототипом симулятора землетрясения

При помощи интерфейса управления прототипа симулятора землетрясения, мы можем воспроизводить заданную сейсмограмму землетрясения. Кроме того, имеется возможность ручного управления поступательным движением прототипа симулятора землетрясения: вперед-назад, влево-вправо.

Результаты и обсуждение

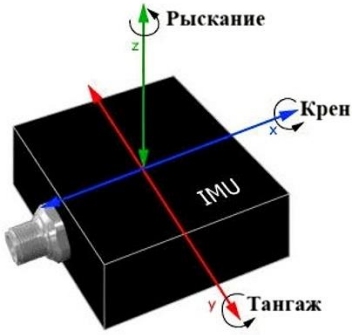
Эксперимент по управлению движением прототипа симулятора землетрясения. Зададим траекторию движения платформы симулятора в виде уравнения

$$\begin{cases} x = 0.2\sin(2\pi \cdot 0.5t)\sin(2\pi \cdot 0.05t) \\ y = 0, \\ z = 0, \\ 0 \le t \le 10 \end{cases} \quad (13)$$

Уравнение (13) описывает движение платформы в направлении оси X, с максимальной амплитудой в пределах ± 0.2 м.



(а)



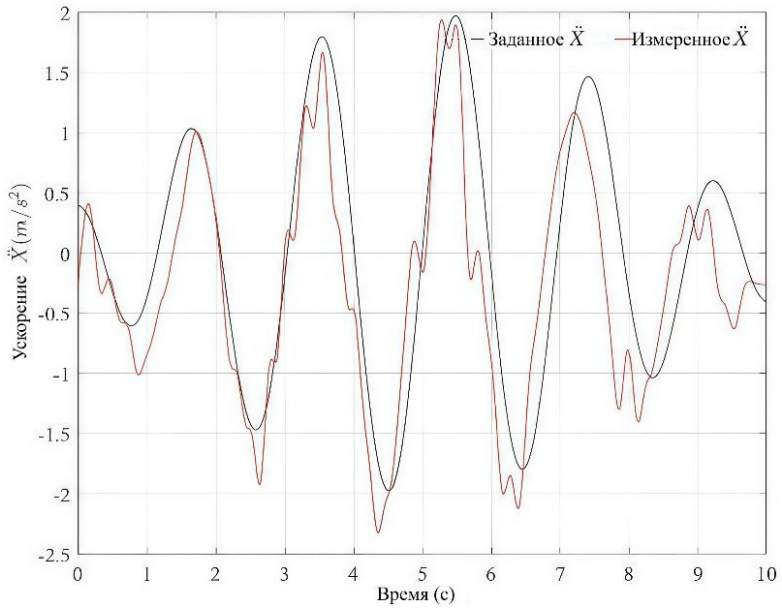
(б)

Рисунок 7. Инерциальный измерительный блок IMU: (а) WHEELTEC N200, (б) Углы измеряемые датчиком

Уравнение движения задается в виде синусоидальной волны с частотой 0,5 Гц, амплитуда которой модулируется огибающей с частотой 0,05 Гц.

Для измерения ускорения платформы в направлении движения оси X, проводились при помощи инерциального измерительного блока WHEELTEC N200 [16], показанного на рисунке 7. WHEELTEC N200 представляет собой инерциальный измерительный блок (IMU) с 9 степенями свободы в одном корпусе. Он содержит 3-осевой акселерометр, 3-осевой гироскоп, 3-осевой магнитометр.

На рисунке 8 показаны заданное и измеренное ускорения платформы в направлении оси X. [17]. Как видно, из рисунке 8 симулятор может обеспечить пиковые значения ускорения заданной траектории движения платформы. Заданное ускорение траектории движения платформы в направлении оси X определяется путем двойного интегрирования уравнения (13).



Рисунке 8. Заданное и измеренное ускорения платформы в направлении оси X

2) Рассмотрим вертикальное движение платформы симулятора в направлении оси Z заданное уравнением

$$\begin{cases} z = 0.05\sin(2\pi \cdot 0.5t)\sin(2\pi \cdot 0.05t) \\ x = 0;\ y = 0;\ 0 \le t \le 10 \end{cases} \quad (14)$$

Измерения ускорения платформы в направлении движения оси Z, проводились при помощи инерциального измерительного блока WHEELTEC N200. На рисунке 9 показаны заданное и измеренное ускорения платформы в направлении оси Z. Заданное ускорение траектории движения платформы в направлении оси Z определяется путем двойного интегрирования уравнения (14).

Как видно из рисунка 9 симулятор может обеспечить пиковые значения ускорения заданной траектории движения платформы в направлении оси Z.

Экспериментальные исследования прототипа симулятора землетрясения с участием человека. Проведены экспериментальные исследования прототипа симулятора землетрясения с участием человека (см. Рисунок 10),

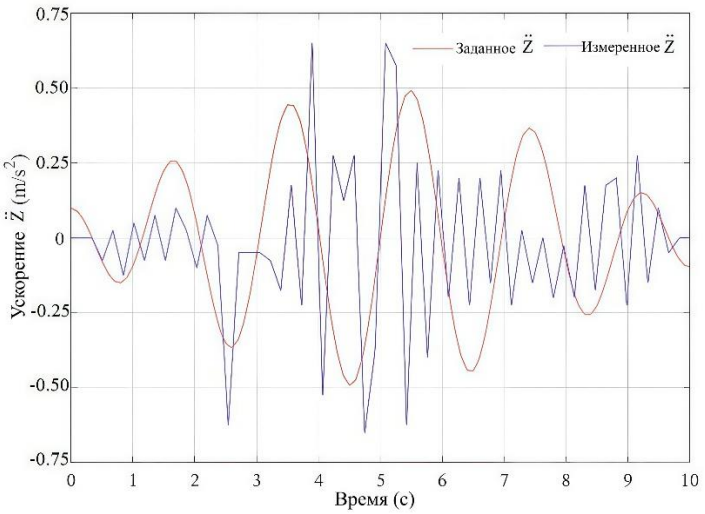


Рисунок 9. Заданное и измеренное ускорения платформы в направлении оси Z

Эксперименты проводились с различными людьми имеющих опыт прошедших землетрясений, при воспроизведении сейсмограммы землетрясения по оси X в виде уравнения (13) и по оси Z в виде уравнения (14). Из опроса людей после испытаний многие из них подтвердили эффект ощущения реального землетрясения.



(а) (б)

Рисунок 10. Нахождение человека на прототипе симулятора землетрясения: (а) стоя, (б) сидя

На голову человека одевали каску с прикрепленным к нему датчиком IMU, как показано на рисунке 10. С помощью датчика IMU были сняты показания параметров ускорения и углов отклонения головы человека тангаж, крен и рыскание, как показано на рисунке 7 б, при положениях сидя и стоя (Рисунок 10 а, б).

На рисунке 11 показаны экспериментальные графики ускорений по оси X, У и Z и углов тангажа, крена и рыскания головы человека в положениях сидя и стоя.



Рисунок 11. Экспериментальные графики ускорений по оси X, У и Z и углов тангажа, крена и рыскания головы человека в положениях сидя и стоя

Для оценки полученных экспериментальных результатов, определим среднее квадратические значения (СКЗ) ускорений по осям X, У и Z и углов тангажа, крена и рыскания головы человека в положениях сидя и стоя (см. Таблицу 3).

Таблица 3. СКЗ экспериментальных значений

Положение человека на симуляторе	Ẍ (м/с²)	Ÿ (м/с²)	Z̈ (м/с²)	Тангаж (град.)	Крен (град.)	Рыскание (град.)
Сидя	2,03	1,04	9,23	5,24	2,43	4,32
Стоя	4,47	2,37	9,53	9,65	4,2	10,78

Из таблицы 3 видно, что СКЗ ускорений по осям X, У и Z и углов тангажа, крена и рыскания головы человека в положении стоя почти в два раза чем в положении сидя.



Рисунок 12. Отклонение тела человека при положении стоя, при сильном землетрясении

В ходе экспериментов на симуляторе землетрясения с участием человека, установлено, что человек в положение стоя, при сильном землетрясении, не может удержать равновесие и склонен к падению (см. Рисунок 12)

Из анализа проведенных экспериментальных исследований прототипа симулятора землетрясения с участием человека, была выдана рекомендация, что при сильном землетрясении необходимо обязательно присесть или двигаться на коленях, во избежание падения и получения травмы. Проведенные испытания людей на симуляторе землетрясения показали, что при воспроизведении сильного землетрясения, никто из людей не смог удержать равновесие в положение стоя и им приходилось держатся за поручни.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования прототипа симулятора землетрясения на основе ТПР. Тестовые траектории движения мобильной платформы в направлении оси X, Y и движения вертикальной платформы были заданы в виде синусоидальной волны с частотой 0,5 Гц, амплитуда которой модулируется огибающей с частотой 0,05 Гц. Заданы следующие максимальные амплитуды по оси X в пределах ± 0.2 м, по оси Y в пределах ± 0.05 м, по оси Z в пределах ± 0.05 м. Экспериментальные исследования подтвердили возможность воспроизведения прототипом симулятора землетрясений заданных ускорений направлении оси X, Y и Z согласно заданной сейсмограммы. Результаты экспериментальных исследований показали способность разработанного прототипа симулятора землетрясения воспроизводить сейсмограмму землетрясения. Проведены экспериментальные исследования прототипа симулятора землетрясения с участием человека, которые подтвердили эффект ощущения реального землетрясения. С помощью датчика IMU были сняты показания параметров ускорения и углов отклонения головы человека при положениях сидя и стоя. Из анализа полученных результатов проведенных испытаний симулятора землетрясения, были выданы рекомендации поведения людей при сильном землетрясении.

Благодарность, конфликт интересов

Работа выполнена в рамках грантового проекта AP26195455 «Разработка симулятора землетрясения для обучения поведения людей при землетрясении на основе тросового параллельного робота» и финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

Вклад авторов:

А.А. Джомартов: разработал концепцию исследования, идею работы, методологию.
А.А. Абдураимов: провел литературный обзор, исследование состояния проблемы, проектирование прототипа.
А.Н. Камал: провел разработку системы управления и сбор данных с датчика.

Список литературы

1. Koketsu K., Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion // Journal of Seismology. – 2008. – Vol. 12, № 2. – P. 133–143. – DOI: 10.1007/s10950-007-9080-0.
2. Ohtani K., Ogawa N., Katayama T., Shibata H. Construction of E-Defense (3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility) // Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. – Vancouver, B.C., Canada, 2004. – Paper № 189.
3. Roh S.-G., Taguchi Y., Nishida Y., Yamaguchi R., Fukuda Y., Kuroda S., Yoshida M., Fukushima E.F., Hirose S. Development of the portable ground motion simulator of an earthquake // Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – Tokyo, Japan, 2013. – P. 5339–5344.
4. Ouellette J.F., Poeling D.L. Earthquake simulator: patent US 4112776A. – Publ. 12.09.1978.
5. Li B., Wang L., Liu Y., Zheng S. Vehicular earthquake simulator based on 4-RPS space parallel mechanism: patent CN 101819727A. – Publ. 01.09.2010.
6. Matsuura D., Ishida S., Akramin M., Küçüktabak E., Sugahara Y., Takeda Y., Fukuwa N., Yoshida M. Conceptual design of a cable driven parallel mechanism for planar earthquake

simulation // ROMANSY 21 – Robot Design, Dynamics and Control. – Cham: Springer, 2016. – P. 403–411. – DOI: 10.1007/978-3-319-33714-2_45.
7. Джомартов А.А., Камал А.А., Абдураимов А.Е., Джамалов Н.К. Симулятор землетрясения: Евразийский патент на изобретение № 040346. – 2022.
8. Wu Q., Zi B., Hu B., Li Y. Design, kinematics and stiffness analysis of a reconfigurable cable driven parallel robot // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 38. – Article № 98. – DOI: 10.1186/s10033-025-01267-x.
9. Tho T.P., Thinh N.T., Zhang X. An overview of cable-driven parallel robots: workspace, tension distribution, and cable sagging // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID 2199748. – P. 1–15. – DOI: 10.1155/2022/2199748.
10. Guerra F., Idà E., Carricato M., Agrawal S. Performance evaluation of cable-driven wrench applicators: geometric and experimental analysis // Robotics. – 2026. – Vol. 15, № 2. – Article № 36. – DOI: 10.3390/robotics15020036.
11. Trautwein F., Dietrich D., Pott A., Verl A. Strategy for topological reconfiguration of cable-driven parallel robots // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2025. – Vol. 17, № 1. – Article № 010908. – DOI: 10.1115/1.4065642.
12. Dion-Gauvin P., Gosselin C. Trajectory planning for the static to dynamic transition of point-mass cable-suspended parallel mechanisms // Mechanism and Machine Theory. – 2017. – Vol. 113. – P. 158–178. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.03.003.
13. Pott A. Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – 465 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-76138-1.
14. Джомартов А.А., Камал А.А. Проектно-конструкторская документация (ПКД) прототипа симулятора землетрясения на основе плоского тросового параллельного робота [Электронный ресурс] // Mendeley Data. – 2026. – Version 1. – DOI: 10.17632/68mtrcj9bc.1. – URL: https://data.mendeley.com/datasets/68mtrcj9bc/1 (дата обращения: 04.02.2026).
15. ZETLAB [Electronic resource]. – URL: https://zetlab.com (accessed: 17.05.2026).
16. WHEELTEC N200 ROS IMU Module [Electronic resource]. – URL: https://wheeltec.net/product/html/?180.html (accessed: 16.05.2026).
17. Jomartov A., Tuleshov A., Seidakhmet A., Kamal A., Abduraimov A. Experimental determination of trajectory of motion and tensions of cable-suspended parallel robot with point-mass end-effector // International Journal of Mechanical Engineering Education. – 2025. – OnlineFirst. – DOI: 10.1177/03064190251356823.

A.A.Jomartov, A.E. Abduraimov, A.N. Kamal

U.A. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan

Experimental Studies of an Earthquake Simulator Based on a Cable Parallel Robot

Abstract. Earthquake simulator design is currently receiving significant attention worldwide. An earthquake simulator is a device that reproduces seismic waves generated during an earthquake. This paper presents an experimental study of an earthquake simulator based on a cable parallel robot (CPR) for reproducing three-dimensional ground motion during an earthquake, based on a given seismogram. The experimental studies were conducted on a

prototype CPR-based earthquake simulator manufactured at the U.A. Joldasbekov Institute of Mechanical Engineering. The prototype earthquake simulator has two moving platforms. The mobile platform of the earthquake simulator prototype performs translational movements in the X and Y directions using a CPR, while vertical translational movement of the platform along the Z axis is achieved by a cam drive. Experimental studies of the earthquake simulator prototype were conducted to determine the feasibility of reproducing a given earthquake seismogram. Experimental studies of the earthquake simulator prototype with human participants demonstrated the effect of sensing a real earthquake. Using an IMU sensor, acceleration parameters and head tilt angles were recorded in sitting and standing positions. Based on the analysis of the earthquake simulator test results, recommendations were developed for human behavior during a strong earthquake.

Keywords: cable parallel robot, earthquake simulator, seismogram, prototype, IMU sensor

References

1. Koketsu K., Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion // Journal of Seismology. – 2008. – Vol. 12, № 2. – P. 133–143. – DOI: 10.1007/s10950-007-9080-0.
2. Ohtani K., Ogawa N., Katayama T., Shibata H. Construction of E-Defense (3-D Full-Scale Earthquake Testing Facility) // Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. – Vancouver, B.C., Canada, 2004. – Paper № 189.
3. Roh S.-G., Taguchi Y., Nishida Y., Yamaguchi R., Fukuda Y., Kuroda S., Yoshida M., Fukushima E.F., Hirose S. Development of the portable ground motion simulator of an earthquake // Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – Tokyo, Japan, 2013. – P. 5339–5344.
4. Ouellette J.F., Poeling D.L. Earthquake simulator: patent US 4112776A. – Publ. 12.09.1978.
5. Li B., Wang L., Liu Y., Zheng S. Vehicular earthquake simulator based on 4-RPS space parallel mechanism: patent CN 101819727A. – Publ. 01.09.2010.
6. Matsuura D., Ishida S., Akramin M., Küçüktabak E., Sugahara Y., Takeda Y., Fukuwa N., Yoshida M. Conceptual design of a cable driven parallel mechanism for planar earthquake simulation // ROMANSY 21 – Robot Design, Dynamics and Control. – Cham: Springer, 2016. – P. 403–411. – DOI: 10.1007/978-3-319-33714-2_45.
7. Dzhomartov A.A., Kamal A.A., Abduraimov A.E., Dzhamalov N.K. Simulyator zemletryaseniya: Evrazijskij patent na izobretenie № 040346. – 2022. [in Russian].
8. Wu Q., Zi B., Hu B., Li Y. Design, kinematics and stiffness analysis of a reconfigurable cable driven parallel robot // Chinese Journal of Mechanical Engineering. – 2025. – Vol. 38. – Article № 98. – DOI: 10.1186/s10033-025-01267-x.
9. Tho T.P., Thinh N.T., Zhang X. An overview of cable-driven parallel robots: workspace, tension distribution, and cable sagging // Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID 2199748. – P. 1–15. – DOI: 10.1155/2022/2199748.
10. Guerra F., Idà E., Carricato M., Agrawal S. Performance evaluation of cable-driven wrench applicators: geometric and experimental analysis // Robotics. – 2026. – Vol. 15, № 2. – Article № 36. – DOI: 10.3390/robotics15020036.
11. Trautwein F., Dietrich D., Pott A., Verl A. Strategy for topological reconfiguration of cable-driven parallel robots // Journal of Mechanisms and Robotics. – 2025. – Vol. 17, № 1. – Article № 010908. – DOI: 10.1115/1.4065642.

12. Dion-Gauvin P., Gosselin C. Trajectory planning for the static to dynamic transition of point-mass cable-suspended parallel mechanisms // Mechanism and Machine Theory. – 2017. – Vol. 113. – P. 158–178. – DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2017.03.003.
13. Pott A. Cable-Driven Parallel Robots: Theory and Application. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – 465 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-76138-1.
14. Dzhomartov A.A., Kamal A.A. Proektno-konstruktorskaya dokumentaciya (PKD) prototipa simulyatora zemletryaseniya na osnove ploskogo trosovogo parallel'nogo robota [Elektronnyj resurs] // Mendeley Data. – 2026. – Version 1. – DOI: 10.17632/68mtrcj9bc.1. – URL: https://data.mendeley.com/datasets/68mtrcj9bc/1 (data obrashcheniya: 14.05.2026). [in Russian].
15. ZETLAB [Electronic resource]. – URL: https://zetlab.com (accessed: 17.05.2026).
16. WHEELTEC N200 ROS IMU Module [Electronic resource]. – URL: https://wheeltec.net/product/html/?180.html (accessed: 16.05.2026).
17. Jomartov A., Tuleshov A., Seidakhmet A., Kamal A., Abduraimov A. Experimental determination of trajectory of motion and tensions of cable-suspended parallel robot with point-mass end-effector // International Journal of Mechanical Engineering Education. – 2025. – OnlineFirst. – DOI: 10.1177/03064190251356823.

Сведения об авторах:

Джомартов Асылбек Абдразакович – автор для корреспонденции, профессор, доктор технических наук, руководитель отдела ОЭРК института механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, ул. Курмангазы 29, 050010, г. Алматы. Казахстан
Абдураимов Азизбек Ералиевич - доктор PhD, главный конструктор отдела ОЭРК института механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, ул. Курмангазы 29, 050010, г. Алматы. Казахстан
Камал Азиз Нутпулла-оглы - магистр, инженер электронщик отдела ОЭРК института механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, ул. Курмангазы 29, 050010, г. Алматы. Казахстан

Jomartov Assylbek Abdrazakovich – corresponding author, professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Economic and Experimental Design of the Institute of Mechanics and Engineering named after. U.A. Dzholdasbekova, st. Kurmangazy 29, 050010, Almaty. Kazakhstan
Abduraimov Azizbek Eralievich - Phd., chief designer of the Department of OERK Institute of Mechanics and Engineering named after. U.A. Dzholdasbekova, st. Kurmangazy 29, 050010, Almaty. Kazakhstan
Kamal Aziz Nutpulla-ogly - master, electronics engineer of the department of OERK Institute of Mechanics and Engineering named after. U.A. Dzholdasbekova, st. Kurmangazy 29, 050010, Almaty. Kazakhstan

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Article https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-222-233

Methods of source code summarization: from abstract syntax trees to heterogeneous graph neural networks

A. Alkhanova

School of Computer Science, Tongji University, Shanghai, China

E mail: a702a@mail.ru

Abstract. This article examines automatic source code summarization as an important area of software engineering focused on generating concise natural language descriptions of program functionality and structure. The study addresses the problem that many existing methods rely mainly on local syntactic patterns and therefore do not fully capture deeper semantic context, reducing the quality and practical value of generated summaries. The purpose of the research is to analyze approaches based on abstract syntax trees, graph-based program representations, and heterogeneous graph neural networks, and to identify their strengths and limitations in modeling program semantics. The methodology relies on a comparative analysis of code representation techniques and context propagation mechanisms used in modern summarization systems. The results show that syntax-oriented models effectively encode local hierarchical relations but poorly represent long-range dependencies. Graph-based and heterogeneous graph approaches provide broader semantic coverage through control-flow, data-flow, and multi-level context aggregation, supporting more accurate automated documentation and developer assistance tools.

Keywords: source code summarization, abstract syntax tree, heterogeneous graph, graph neural networks, UML diagrams, machine learning.

Received 02.11.2025. Revised 03.03.2026. Accepted 06.04.2026. Available online 30.06.2026

* the corresponding author

Introduction

Source code summarization focuses on generating short natural language descriptions that convey the purpose and functionality of program fragments. Such summaries play an important role in software development by supporting program comprehension, code review, maintenance, and knowledge transfer. As software systems grow in size and complexity, developers increasingly rely on automated tools to understand unfamiliar code, making reliable code summarization a practically relevant research problem.

Early approaches to code summarization relied on rule-based techniques and information retrieval methods, which required handcrafted templates or similar code examples and therefore lacked generalization capability. With the availability of large-scale code repositories, data-driven neural models became the dominant paradigm. These models initially treated source code as a token sequence and later incorporated syntactic structure through abstract syntax trees. While syntax-aware models improved local structural understanding, they remained limited in capturing semantic relationships that extend beyond individual methods.

In object-oriented software, the meaning of a method is often determined not only by its internal implementation but also by its enclosing class, inherited behavior, and interactions with other classes. Ignoring such context leads to incomplete or ambiguous summaries. This limitation motivates the transition from purely syntax-based representations toward graph-based and heterogeneous models that explicitly encode control flow, data flow, and inter-class relationships. Understanding how these representations affect summarization quality is essential for designing context-aware and semantically informed summarization systems, which forms the central motivation of this study.

The research presented in this article is conducted under a set of technical constraints that reflect both practical deployment conditions and publication requirements. From a methodological perspective, summarization models must operate on real-world source code, handle large codebases, and remain computationally feasible within standard hardware environments. These constraints influence the choice of representations, favoring models that balance expressive power with scalability.

The study assumes a standardized experimental and reporting framework consistent with contemporary software engineering research. The article follows the IMRAD structure to ensure clarity and reproducibility, with a clear separation between methodological description, empirical results, and their interpretation. The presentation of results requires at least one visual element, such as a figure or table, to support analytical observations and illustrate comparative trends.

From a technical writing perspective, the article adheres to strict formatting and structural requirements, including consistent typography, page layout, and citation style. These requirements impose limitations on article length and encourage concise yet informative exposition. As a result, the analysis emphasizes representative methods and core architectural ideas rather than exhaustive implementation details. Such constraints shape the scope of the study and ensure that the proposed analysis remains both technically rigorous and accessible to a broad research audience.

Literature Review

The emergence of transformer architectures marked a turning point in neural code summarization. Ahmad et al. demonstrated that a relatively simple transformer model, when equipped with relative positional encodings, can outperform both sequence-based and

structurally-enhanced models on code summarization tasks [1]. Their analysis revealed that absolute positional encodings, commonly used in NLP, are ill-suited for code because they fail to reflect hierarchical and relational structure [1, p. 5002]. Relative positional representations, by contrast, allow the model to focus on relationships between tokens rather than their absolute positions, resulting in improved generalization and performance.

This line of work laid the foundation for large-scale pre-training approaches that treat code and natural language as complementary modalities. Subsequent models, including CodeBERT [17], PLBART [2], and CodeTrans [16], adopted transformer architectures trained on massive corpora of code–comment pairs and unimodal code data. These models demonstrated that pre-training on diverse programming languages and tasks yields representations that transfer effectively to code summarization, search, and generation [2, p. 2658; 17, p. 1540].

While AST-based methods improved performance, they still failed to capture certain semantic aspects of program behavior, particularly those related to data flow and control dependencies that are not explicitly encoded in syntax trees. Addressing this limitation, Allamanis et al. proposed representing programs as graphs that unify syntactic, semantic, and control-flow information [4]. In this representation, nodes correspond to program elements such as variables and statements, while edges encode relationships including data dependencies and control flow. Graph neural networks (GNNs) operating over such representations demonstrated superior performance on tasks requiring semantic reasoning, such as variable naming and misuse detection [4, p. 6–8]. These results suggested that program graphs provide a more faithful abstraction of code semantics than linear or tree-based representations alone.

However, subsequent research revealed intrinsic limitations of graph-based neural architectures. Alon and Yahav identified the phenomenon of over-squashing in GNNs, whereby information propagated over long graph distances becomes compressed into fixed-size representations, leading to the loss of critical contextual signals [7, p. 3–5].

One of the earliest contributions influencing the evaluation of code summarization systems originates outside the software engineering domain. Banerjee and Lavie introduced the METEOR metric as an alternative to BLEU for machine translation evaluation, explicitly addressing known weaknesses of n-gram precision-based metrics [8]. METEOR aligns candidate and reference texts using exact matches, stem matches, and synonym matches, and combines precision and recall with a fragmentation penalty that accounts for word order coherence [8, p. 66–68]. As evaluation practices matured, concerns regarding the robustness of neural models for code analysis began to emerge. Bielik and Vechev were among the first to systematically investigate adversarial vulnerabilities in neural models operating on source code [9]. Instead of predicting a single label, Code2seq employs an attention-based decoder that dynamically selects relevant AST paths during the generation process. Alon et al. demonstrated that Code2seq achieves state-of-the-art results on code summarization benchmarks across multiple programming languages, significantly surpassing traditional encoder–decoder models adapted from NMT [5, p. 8–9].

Parallel to robustness concerns, interpretability emerged as a central issue in attention-based architectures. While attention mechanisms are often informally interpreted as explanations, Bui et al. challenged this assumption through their AutoFocus framework [10]. AutoFocus combines attention weight analysis with systematic code perturbation: individual statements are removed or modified, and the resulting change in model output is measured [10, p. 39]. By comparing attention distributions with actual impact on predictions, the authors showed that attention weights alone are unreliable indicators of feature importance. In many cases, highly attended tokens had little effect on the generated summary, while low-attention elements were critical to

the model's decision [10, p. 40]. Figure 1 illustrates a generalized conceptual taxonomy of approaches to automatic source code summarization, reflecting the dominant modeling paradigms that have emerged in the literature over the past decade.

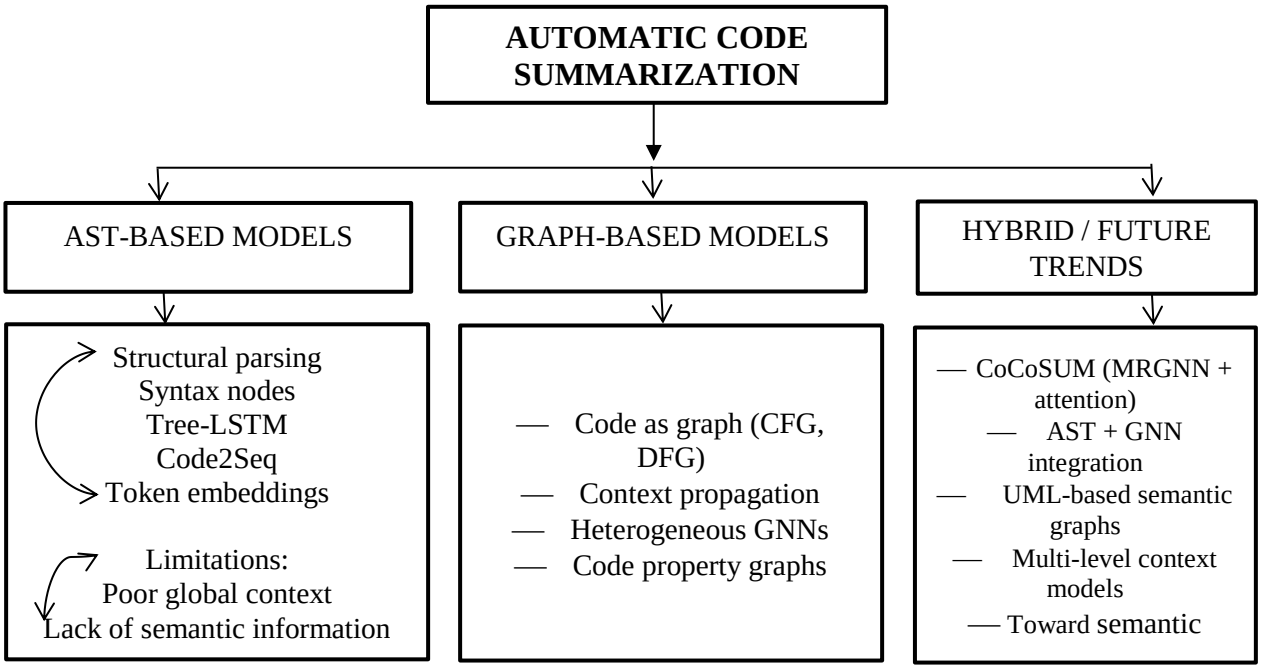


Figure 1. Conceptual mind map of research directions in automatic code summarization.
Note: compiled by the author based on reviewed studies [5-7]

AST-based models constitute the earliest structurally informed category. These approaches leverage the hierarchical structure of abstract syntax trees to encode syntactic relations between program elements. Techniques such as Tree-LSTM, path-based encodings (e.g., Code2Seq), and token-level embeddings aim to capture compositional structure beyond flat token sequences. However, as indicated in Figure 1, these models are constrained by limited access to global context and insufficient modeling of semantic dependencies, particularly data flow and control interactions across distant code regions.

Graph-based models represent a conceptual shift toward semantic reasoning. By modeling code as graphs—such as control flow graphs (CFGs), data flow graphs (DFGs), or unified code property graphs—these approaches enable information propagation across non-local dependencies. Heterogeneous graph neural networks further extend this paradigm by explicitly distinguishing between different node and edge types. As depicted in Figure 1, graph-based models address several limitations of AST-based methods but introduce new challenges related to scalability, information bottlenecks, and architectural complexity.

The earliest attempts at automatic source code summarization were deeply influenced by advances in neural machine translation (NMT), where the task is formulated as learning a conditional probability distribution over target language sequences given an input sequence. In this paradigm, source code is treated analogously to a foreign language sentence, while the generated summary corresponds to its translation into natural language. The conceptual

foundations of this approach can be traced to the encoder–decoder framework introduced by Cho et al., which demonstrated that recurrent neural networks equipped with gating mechanisms are capable of mapping variable-length input sequences to variable-length outputs while preserving essential semantic information [15]. Despite these limitations, the NMT formulation provided an important conceptual breakthrough: it established code summarization as a conditional generation problem, enabling the direct application of neural generation techniques. Early neural models demonstrated that even when code is treated as a flat token sequence, neural networks can learn non-trivial correspondences between syntactic patterns and natural language descriptions. This insight motivated a wave of research exploring whether richer representations of code could mitigate the deficiencies of purely sequential models. Moving beyond interpretability, Bui et al. later introduced a self-supervised contrastive learning framework for code representation learning, commonly referred to as Corder [11]. The central idea is to construct positive and negative pairs of code fragments using semantic-preserving and semantic-altering transformations. Corder thus represents a shift toward learning semantic invariances explicitly rather than relying solely on supervised generation objectives.

Another notable architectural innovation is the introduction of TreeCaps, a tree-based capsule network for source code processing [12]. Capsule networks were originally proposed to preserve hierarchical relationships in visual data, and Bui et al. adapted this concept to abstract syntax trees. Complementary to capsule-based architectures, Chai and Li proposed the Pyramid Attention mechanism to address the multi-granular nature of source code [13]. Their approach represents code at multiple abstraction levels, ranging from sub-tokens to full statements, and applies separate attention mechanisms at each level before aggregating the resulting representations [13, p. 3–4]. Pre-training objectives also continued to evolve. Chakraborty et al. introduced NatGen, which departs from conventional denoising objectives by focusing on the naturalness of code [14]. Instead of reconstructing masked tokens, NatGen trains models to recover original code from “naturalized” variants obtained via semantic-preserving transformations such as variable renaming and dead-code insertion [14, p. 20–22]. Finally, Fernandes et al. proposed Structured Neural Summarization, a hybrid architecture that integrates sequential and structural encoders [18].

The methodology

The task of source code summarization is formulated as a conditional sequence generation problem. Given a source code fragment CCC, the objective is to generate a natural language summary S= (s1, s2, sT) S = (s_1, s_2, \dots, s_T) S= (s1, s2, sT) that describes the functionality of the code. The model learns a conditional probability distribution:

$$P(S \mid C) = \prod_{t=1}^{T} P(s_t \mid s_1, \dots, s_{t-1}, C) \quad (1)$$

Unlike plain sequence-based approaches, this study represents the source code CCC as a structured object that integrates syntactic and semantic relations. The goal is to evaluate how different structural representations affect the quality and semantic completeness of the generated summaries. Source code is processed using a multi-stage pipeline. First, each code fragment is parsed into an abstract syntax tree (AST) using a language-specific parser. AST nodes represent

syntactic constructs, while edges capture parent–child relationships. To enrich the representation with semantic information, additional relations are extracted:

- control-flow relations between statements;
- data-flow relations between variable definitions and uses;
- inter-method and inter-class relations in object-oriented code.

These relations are combined into a heterogeneous program graph G = (V, E, R), where V denotes the set of nodes, E the set of edges, and R the set of relation types. To encode the heterogeneous program graph, a multi-relational graph neural network is applied. For each node v, hidden representations are updated through message passing:

$$h_v^{(l+1)} = \sigma\left(\sum_{r,Wr(l)} w_r^{(l)} h_u^{(l)}\right) \quad (2)$$

Where $N_{r(v)}$ denotes the neighbors of node v connected via relation r, $W_{r(l)}$ is a relation-specific weight matrix, l is the layer index, and σ\sigmaσ is a nonlinear activation function.

All experiments are conducted using Python-based frameworks for deep learning and graph processing. Program graphs are constructed using static analysis tools, while neural models are implemented using widely adopted machine learning libraries. Training and evaluation are performed on GPU-enabled hardware to ensure computational efficiency. The entire pipeline, including preprocessing, model training, and evaluation, is designed to be reproducible using fixed random seeds and standardized configurations.

The research workflow follows a fixed sequence of steps: data preprocessing, graph construction, model training, and evaluation. Configuration files define hyperparameters and model variants, enabling consistent replication of experiments. Intermediate representations and trained model checkpoints are stored to support further analysis and comparison.

Findings/Discussion

The experimental evaluation demonstrates the practical effectiveness of context-aware and graph-based representations for source code summarization. The results are obtained on two Java datasets, CodeSearchNet and CoCoNet, using four standard evaluation metrics: BLEU-4, METEOR, ROUGE-L, and CIDER.

On the CodeSearchNet dataset, the proposed context-integrated model achieves a BLEU-4 score of 19.04, METEOR of 14.18, ROUGE-L of 30.77, and CIDER of 1.15. These values exceed the strongest baseline results by 8.06%, 9.75%, 10.01%, and 27.78%, respectively. Models relying solely on code tokens or abstract syntax trees show consistently lower performance, indicating limited ability to capture semantic dependencies beyond method-level structure. Graph-free architectures exhibit a noticeable decline in performance as code length increases, while context-aware models maintain stable results across different input sizes.

On the larger CoCoNet dataset, similar trends are observed. The context-enriched model achieves BLEU-4 of 20.15, METEOR of 14.94, ROUGE-L of 31.24, and CIDER of 1.30, outperforming all comparison methods. Retrieval-based models benefit from dataset scale but remain inferior in semantic consistency, particularly for summaries requiring inter-class information. Ablation studies confirm that both intra-class context (class names) and inter-class context (UML-based relations) contribute to performance gains, with inter-class relations providing the largest

improvement. Replacing multi-relational graph modeling with single-relation graphs results in measurable degradation across all metrics, demonstrating the practical necessity of heterogeneous graph representations.

Baseline comparison on CodeSearchNet. Table 2 reports the automatic evaluation of representative neural and hybrid baselines on CodeSearchNet using BLEU-4, METEOR, ROUGE-L, and CIDEr. CoCoSUM achieves the best score in every metric (BLEU-4 = 19.04; METEOR = 14.18; ROUGE-L = 30.77; CIDEr = 1.15) and surpasses the strongest baseline by 8.06%–27.78% depending on the metric.

Table 1. Comparison with baselines on CodeSearchNet [1, p. 13].

Model	BLEU-4	METEOR	ROUGE-L	CIDEr
Code-NN	12.97	7.76	19.54	0.42
Hybrid-DRL	14.14	8.47	21.09	0.64
H-Deepcom	14.48	9.20	22.95	0.51
Attendgru	17.05	12.18	27.20	0.85
Ast-attendgru	17.19	12.43	27.52	0.90
Code2seq	15.02	8.98	23.38	0.61
ASTNN	17.62	10.72	27.76	0.70
Rencos	15.79	12.92	23.35	0.82
NeuralCodeSum	14.54	10.41	27.97	0.82
CoCoSUM	19.04	14.18	30.77	1.15

Note: compiled based on the data [4]

From Table 2 it is evident that methods relying only on token sequences (e.g., Code-NN) underperform, while structurally informed or retrieval-augmented approaches (e.g., Ast-attendgru, Rencos) improve results but still remain behind the proposed model.

Baseline comparison on CoCoNet (generality across datasets). To test transferability, the same family of baselines is evaluated on the independently collected CoCoNet dataset (Table 3). CoCoSUM remains the top performer (BLEU-4 = 20.15; METEOR = 14.94; ROUGE-L = 31.24; CIDEr = 1.30) and improves over the best baseline by 0.61%–7.44% across the four metrics [1, p. 14].

Table 2. Comparison with baselines on CoCoNet

Model	BLEU-4	METEOR	ROUGE-L	CIDEr
Code-NN	13.02	8.90	20.72	0.46
H-Deepcom	16.29	11.86	26.40	0.74
Attendgru	18.55	13.80	29.28	1.11
Ast-attendgru	18.91	13.88	29.48	1.14
Code2seq	14.46	9.31	23.15	0.64
ASTNN	16.79	9.42	25.43	0.52
Rencos	19.18	14.85	27.56	1.21
NeuralCodeSum	16.51	8.60	28.80	1.17
CoCoSUM	20.15	14.94	31.24	1.30

Note: compiled based on the data [4]

An important practical observation from Table 3 is that the retrieval-based baseline Rencos

becomes noticeably stronger on the larger dataset, consistent with the intuition that bigger repositories increase the chance of retrieving near-duplicates; nevertheless, CoCoSUM still leads, indicating that global structural context provides gains beyond retrieval alone.

Table 4 isolates the effect of adding (i) the intra-class channel (class name) and (i) the inter-class channel (UML relations). CoCoSUMu (UML only) yields a larger gain than CoCoSUMc (class name only), and combining both gives the best overall metrics (CoCoSUM: BLEU-4 = 19.04; METEOR = 14.18; ROUGE-L = 30.77; CIDEr = 1.15).

Table 3. Global contexts ablation study [1, p. 15].

Model	BLEU-4	METEOR	ROUGE-L	CIDEr
Ast-attendgru	17.19	12.43	27.52	0.90
CoCoSUMc (UML)	17.28	12.32	27.49	0.89
CoCoSUMu (no class name)	18.82	13.83	30.29	1.12
CoCoSUM (both)	19.04	14.18	30.77	1.15

Note: compiled based on the data [7]

From Table 4, it follows that inter-class information captured from UML relations contributes more strongly than the class-name-only signal, while the joint use of both channels produces the maximum effect, supporting the design choice of explicitly modeling multiple forms of global context.

Qualitative case study (practical error patterns). Table 6 provides two concrete examples showing how global context enables the generation of key tokens that are not reliably produced from local method bodies alone. In Case 1, the enclosing class name (“ClassVisitor”) supplies a crucial concept (“class”), helping the model generate a more faithful summary (“visit a field in the class”) than baselines that drift into generic phrasing.

In Case 2, the UML relation (DEPEND) between the enclosing class and a neighbor class helps recover a phrase (“property status”) that aligns with the ground truth and is missed by several baselines, illustrating a practical advantage of modeling inter-class semantics explicitly.

The experimental evaluation assesses the effectiveness of different source code representations for the task of automatic code summarization. The results are reported on two widely used Java benchmarks, CodeSearchNet and CoCoNet, using four standard automatic evaluation metrics: BLEU-4, METEOR, ROUGE-L, and CIDEr. All models are evaluated under identical preprocessing and experimental settings to ensure comparability.

On the CodeSearchNet dataset, the proposed context-integrated model (CoCoSUM) achieves the highest scores across all evaluation metrics. Specifically, the model obtains a BLEU-4 score of 19.04, a METEOR score of 14.18, a ROUGE-L score of 30.77, and a CIDEr score of 1.15 (Table 1). These results outperform all baseline models included in the comparison. Sequence-based approaches such as Code-NN demonstrate the weakest performance, while syntax-aware models based on abstract syntax trees show moderate improvements but remain consistently below the proposed method.

From Table 1, it can be observed that AST-based extensions (Ast-attendgru, ASTNN) yield higher scores than token-only models, indicating the benefit of incorporating hierarchical syntactic information. However, even the strongest syntax-aware baselines fail to match the performance of the context-aware graph-based approach, particularly on METEOR and CIDEr, which are more sensitive to semantic adequacy and relevance.

Similar trends are observed on the CoCoNet dataset (Table 2), which is larger and structurally more diverse. On this benchmark, CoCoSUM achieves a BLEU-4 score of 20.15, METEOR of 14.94, ROUGE-L of 31.24, and CIDEr of 1.30, again surpassing all competing methods. Retrieval-based models such as Rencos show noticeable improvements compared to their performance on CodeSearchNet, reflecting the increased likelihood of finding near-duplicate code examples in larger repositories. Nevertheless, the proposed model maintains a clear advantage, indicating that structural context contributes additional information beyond retrieval alone.

Modern code-summarization models differ in the way they represent and process code. Sequence-to-sequence approaches such as CodeNN treat code as plain text, while later models incorporate syntax (AST) or richer program graphs. Table 1 summarizes baseline models evaluated on two widely used Java benchmarks—TL-CodeSum and EMSE-DeepCom. AST-based models (HDeepCom and ASTattGRU) outperform token-only CodeNN, which demonstrates that capturing tree structure improves summary quality. Transformer-based models like NeuralCodeSum further boost BLEU and ROUGE scores by learning long-range dependencies. The hybrid models CAST and TPTrans use tree-path information and achieve even higher scores.

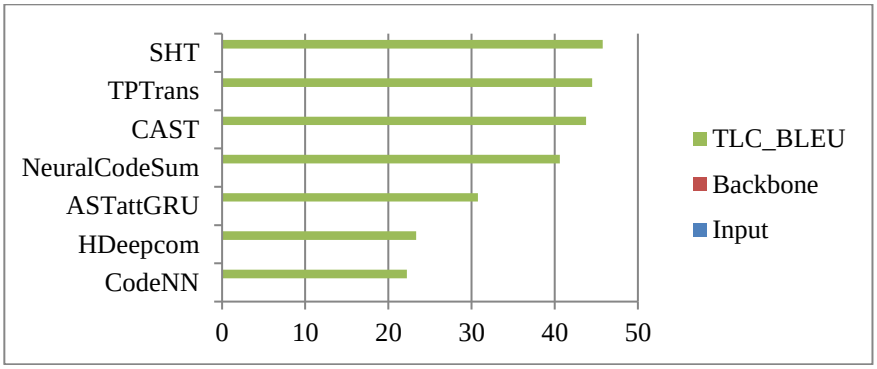


Figure 2. General Process of Automatic Code Summarization
Note: compiled based on the data [14]

This map distinguishes three branches: methods based on abstract syntax trees (ASTs), graph-based approaches using dataflow and control structures, and hybrid models that combine multiple representation types. Each branch lists the most significant models and clearly shows how the methods have evolved—from simple sequential models to complex hybrid systems.

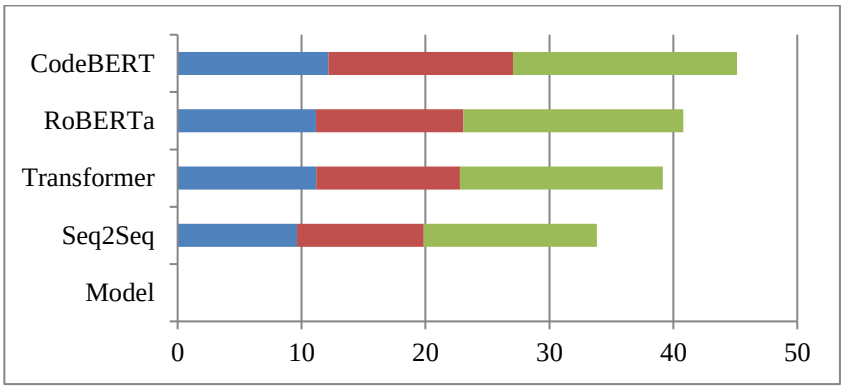


Figure 3. The process of automatic source code summarization
Note: compiled based on the data [14]

The second diagram is a flowchart of the automatic source code summarization process. It contains sequential steps: first, an abstract syntax tree and graphs are extracted from the program, then a representation is constructed using multi-relation graph neural networks and transformers, and finally, a natural language text description is generated. This diagram helps us understand how modern models exploit both local and global relationships in code to generate accurate and meaningful comments. The ablation study presented in Table 3 isolates the impact of different global context channels. When only intra-class information (class name) is used, the performance gain over the AST-based baseline is marginal. In contrast, incorporating inter-class context derived from UML relations results in a substantial improvement across all metrics. The full model, which combines both intra-class and inter-class context, achieves the best overall performance, confirming the complementary nature of these information sources.

In addition to quantitative results, qualitative examples further illustrate the effect of global context integration. In selected cases, the context-aware model successfully generates key semantic terms that are absent from local method bodies but are recoverable from class-level or inter-class relations. Baseline models, in contrast, tend to produce more generic descriptions or omit critical functional concepts.

Conclusion

The conducted study has achieved the stated research goal, namely, to analyze and compare modern approaches to automatic source code summarization with a particular focus on how different structural representations influence the semantic completeness and quality of generated summaries. The obtained results allow for a structured discussion of the main findings in direct correspondence with the research objectives.

1. In accordance with the first research objective, the analysis of sequence-based and syntax-oriented models demonstrates that treating source code as a flat token sequence or relying solely on abstract syntax trees provides only a partial representation of program semantics. While AST-based methods improve over purely sequential approaches by capturing hierarchical structure, they remain limited in modeling long-range dependencies and inter-method or inter-class relations. This confirms that syntactic structure alone is insufficient for producing semantically rich and context-aware summaries.

2. Addressing the second objective, the comparative evaluation shows that graph-based representations significantly enhance summarization performance by explicitly encoding control-flow and data-flow dependencies. The experimental results on CodeSearchNet and CoCoNet indicate consistent improvements across all evaluation metrics when semantic relations are incorporated into the model. These findings highlight the practical importance of representing source code as a structured graph rather than as isolated syntactic units.

3. With respect to the third objective, the study demonstrates that heterogeneous graph neural networks provide an effective mechanism for multi-level context propagation. By distinguishing between different node and edge types, heterogeneous models enable more precise aggregation of local and global information. The ablation study confirms that inter-class context captured through UML-based relations contributes more substantially to performance gains than intra-class context alone, while their combination yields the best overall results.

Final summary. Overall, the study confirms that context-integrated and heterogeneous graph-based representations constitute a promising direction for automatic source code summarization. Despite these advances, several limitations remain unresolved. In particular, the scalability of

heterogeneous graph construction and the computational cost of multi-relational message passing present challenges for large-scale industrial deployment. Future work should therefore focus on optimizing graph construction pipelines, exploring lightweight context selection strategies, and extending the approach to multilingual and cross-project summarization scenarios.

References

1. Ahmad, W. U., Chakraborty, S., Ray, B., & Chang, K.-W. (2020). *A transformer-based approach for source code summarization*. In *Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics* (pp. 4998–5007). ACL.
2. Ahmad, W. U., Chakraborty, S., Ray, B., & Chang, K.-W. (2021). *Unified pre-training for program understanding and generation*. In *Proceedings of NAACL-HLT 2021* (pp. 2655–2668). ACL.
3. Ahmed, T., & Devanbu, P. (2022). *Multilingual training for software engineering*. In *Proceedings of the 44th International Conference on Software Engineering* (pp. 1443–1455). IEEE/ACM.
4. Allamanis, M., Brockschmidt, M., & Khademi, M. (2018). Learning to represent programs with graphs. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
5. Alon, U., Brody, S., Levy, O., & Yahav, E. (2019a). Code2seq: Generating sequences from structured representations of code. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
6. Alon, U., Zilberstein, M., Levy, O., & Yahav, E. (2019b). Code2vec: Learning distributed representations of code. *Proceedings of the ACM on Programming Languages, 3*(POPL), 40:1–40:29.
7. Alon, U., & Yahav, E. (2021). On the bottleneck of graph neural networks and its practical implications. In *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.
8. Banerjee, S., & Lavie, A. (2005). Meteor: An automatic metric for MT evaluation with improved correlation with human judgments. In *Proceedings of the ACL Workshop on Intrinsic and Extrinsic Evaluation Measures for MT/Summarization* (pp. 65–72). ACL.
9. Bielik, P., & Vechev, M. (2020). *Adversarial robustness for code*. arXiv preprint arXiv:2002.04694.
10. Bui, N. D. Q., Yu, Y., & Jiang, L. (2019). AutoFocus: Interpreting attention-based neural networks by code perturbation. In *Proceedings of ASE 2019 (14th International Conference on Automated Software Engineering)* (pp. 38–41). IEEE.
11. Bui, N. D. Q., Yu, Y., & Jiang, L. (2021a). Self-supervised contrastive learning for code retrieval and summarization via semantic-preserving transformations. In *Proceedings of SIGIR 2021* (pp. 511–521). ACM.
12. Bui, N. D. Q., Yu, Y., & Jiang, L. (2021b). TreeCaps: Tree-based capsule networks for source code processing. In *Proceedings of AAAI 2021* (pp. 10461–10468). AAAI Press.
13. Chai, L., & Li, M. (2022). Pyramid attention for source code summarization. In *Advances in Neural Information Processing Systems 35* (NeurIPS 2022).
14. Chakraborty, S., Ahmed, T., Ding, Y., Devanbu, P. T., & Ray, B. (2022). NatGen: Generative pre-training by “naturalizing” source code. In *Proceedings of ESEC/FSE 2022* (pp. 18–30). ACM.
15. Cho, K., van Merriënboer, B., Bahdanau, D., & Bengio, Y. (2014). On the properties of neural machine translation: Encoder–decoder approaches. In *Proceedings of SSST-8, Eighth*

Workshop on Syntax, Semantics and Structure in Statistical Translation (pp. 103–111). ACL.
16. Elnaggar, A., Ding, W., Jones, L., Gibbs, T., Feher, T., Angerer, C., … Rost, B. (2021). Codetrans: Towards cracking the language of silicon's code through self-supervised deep learning and high performance computing. *arXiv preprint arXiv:2104.02443*.
17. Feng, Z., Guo, D., Tang, D., Duan, N., Feng, X., Gong, M., … Zhou, M. (2020). CodeBERT: A pre-trained model for programming and natural languages. In *Findings of the Association for Computational Linguistics: EMNLP 2020* (pp. 1536–1547). ACL.
18. Fernandes, P., Allamanis, M., & Brockschmidt, M. (2019). Structured neural summarization. In *International Conference on Learning Representations (ICLR) Workshop*.

Information about the author:

Alkhanova Assel Bekkyzy – MSc student, School of Computer Science, Tongji University, Address: 4800 Cao'an Highway, Shanghai, China

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Шолу мақала https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-234-243

BIG DATA негізінде жасанды интеллект алгоритмдерін жетілдіру әдістері

Ж.Е.Кенжебаева*[1], Д.К.Самаликова [2], А.А.Жотабаева [3], Р.М.Байназарова [4]

[1,4] Ш.Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университет, Ақтау, Қазақстан
[2] ЖШС "Есенов колледжі", Ақтау, Қазақстан
[3] Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Казахстан

E mail: zhanat.kenzhebayeva@yu.edu.kz, dinara.samalikova@gmail.com, ayauka@list.ru, rysgul.bainazarova@yu.edu.kz

Аңдатпа. Қазіргі заманда Big Data технологиялары мен жасанды интеллект (ЖИ) жүйелерінің өзара байланысы цифрлық трансформацияның негізгі бағыттарының бірі болып отыр. Үлкен деректер көлемін тиімді өңдеу мен талдау жасанды интеллект алгоритмдерінің дәлдігі мен бейімделу қабілетін арттыруға мүмкіндік береді. Бұл шолу мақаласы Big Data платформаларының (мысалы, Hadoop, Spark, Apache Flink) жасанды интеллектті жетілдірудегі рөлі қарастырылады. Сонымен қатар, деректерді жинау, сақтау және алдын ала өңдеу процестерінің алгоритм өнімділігіне әсері талданады. Зерттеу барысында Big Data негізінде жұмыс істейтін machine learning және deep learning әдістері, соның ішінде нейрондық желілерді масштабтау, деректердің корреляциясын есептеу, автоматтандырылған ерекшелік іріктеу (feature selection) және үлгілеу процестері қарастырылды. Үлкен деректер массивтерінен алынған нақты уақыттағы ақпараттар ЖИ жүйелеріне динамикалық бейімделу мен болжам жасау мүмкіндігін береді. Мақалада сондай-ақ Big Data-ның этикалық және техникалық қиындықтары деректер сапасының төмендігі, есептеу қуатының жеткіліксіздігі және құпиялық мәселелері де қамтылған. Авторлар Big Data негізіндегі жасанды интеллект алгоритмдерін жетілдірудің болашағын сипаттай отырып, олардың экономикалық, медициналық және өндірістік салаларда қолданылу мүмкіндіктерін атап өтеді. Қорытындылай келе, Big Data экожүйесін тиімді пайдалану жасанды интеллекттің интеллектуалдық әлеуетін арттырудың негізгі шарты болып табылады.

Түйін сөздер: Big Data, жасанды интеллект, деректерді талдау, машиналық оқыту, нейрондық желілер, алгоритмдерді оңтайландыру,

deep learning, feature engineering, деректер сапасы, цифрлық трансформация.

Received 14.10.2025. Revised 27.04.2026. Accepted 09.05.2026. Available online 30.09.2026.
* the correspondence author

Кіріспе

XXI ғасырдың екінші онжылдығында ақпараттық технологиялар мен цифрлық жүйелер қарқынды дамиды. Интернет, әлеуметтік желілер, сенсорлар, IoT құрылғылары, медициналық және өндірістік жүйелер секілді әртүрлі көздерден келетін деректер көлемі күннен-күнге ұлғайып жатыр [1]. Осы деректер – Big Data – жасанды интеллект (ЖИ) әдістерін қолдану үшін таптырмас ресурс, себебі ол алгоритмдерге жылдамдық, дәлдік, бейімделгіштік секілді қасиеттер береді. Дегенмен, үлкен деректерді тиімді пайдалану – автоматты түрде сапалы пишінде дайындау, өңдеу, ерекшеліктерді ерекшелеп алу (feature engineering), модельдерді тренингке дайындау сияқты кешенді іс-әрекеттерді қажет етеді. Алгоритмдердің өнімділігіне әсер ететін факторлардың бірі деректердің сапасы (accuracy, completeness, consistency), ал басқа факторлар: масштабтау (scalability), есептеу ресурстары, алгоритмдік оңтайландыру, нақты уақыттағы есептерді шешу мүмкіндігі, бейнелі емес деректермен (unstructured data) жұмыс істеу, және этикалық-заңдық мәселелер [2].

Бұл мақалада біз Big Data негізінде жасанды интеллект алгоритмдерін жетілдіру әдістерін жан-жақты қарастырамыз. Біріншіден, деректерді жинау, сақтау, интеграциялау, алдын ала өңдеу (pre-processing) сияқты қадамдары талқыланады. Екіншіден, ерекшелік іріктеу (feature selection), ерекшелік құрылымы (feature construction), автоматтандырылған ерекшелік жасау, AutoML, нейрондық желілерді масштабтау, трансфер-оқыту (transfer learning), онлайн оқыту сияқты әдістер қарастырылады. Үшіншіден, модельдердің өнімділігі, нақты уақыттағы қолданылу, есептеу үздіксіздігі, ресурстарды тиімді пайдалану, этика мен деректердің құпиялығы мәселелері туралы болады. Сонымен қатар қазіргі зерттеулерде деректер сапасын жақсарту, басқару (governance), автоматизация құралдарын пайдалану маңызы өсіп келеді. Мақсат – Big Data мен ЖИ-нің қосындысында алгоритмдердің тиімділігін, жалпы қолданысты кеңейтуге бағытталған кешенді әдістерді көрсету [4].

Big Data жүйелері құрылымдалған (structured), жартылай құрылымдалған (semi-structured), және бейнелі емес (unstructured) деректерді қамтиды. Бұл түрлі көздер: әлеуметтік желі, видео, аудио, сенсорлар, логтар, медициналық жүйелер т.б. интеграциялауды талап етеді. Деректердің әртүрлі форматтары мен өлшемдері деректерді біріктіру мен үйлестіру үдерістерінде қиындықтар тудырады.

Деректерде қателіктер, толық еместік, қайталанулар, шулы мәліметтер болады. Бұл сапасыз деректер ЖИ алгоритмдерінің өнімділігін төмендетеді. Мысалы, «Hitachi Vantara» мәліметі бойынша, ұйымдардың 37 %-ы деректер сапасын ЖИ жобаларының табысына кедергі деп санайды. Сондай-ақ, деректерді алдын ала тексеру, толықтық, нақтылық, үйлесімділік, уақыттылық сияқты өлшемдерді бағалау қажет [5].

Деректерді өңдеу кезеңі – деректерді тазарту, нормалау (normalization), масштабтау (scaling), кодтау (encoding) және бос орындарды толықтыру (imputation) сияқты қадамдар. Жақында деректер өңдеудің автоматтандырылған тәсілдері, соның ішінде AutoML құралдары, деректерді автоматты түрде жапсыру (labeling), деректерді кеңейту (augmentation), синтетикалық деректер генерациясы қолданылып жүр.

Әдіснама

Бұл зерттеу жұмысы Big Data негізінде жасанды интеллект алгоритмдерін жетілдіру әдістеріне қатысты заманауи ғылыми еңбектерге аналитикалық және салыстырмалы талдау жүргізу арқылы орындалды. Негізгі әдістер ретінде контент-талдау, салыстырмалы талдау, және жүйелеу әдісі пайдаланылды.

Материалдық база ретінде 2023–2025 жылдары жарық көрген ғылыми мақалалар мен шолулар алынды. Атап айтқанда, Alhassan Mumuni және Fuseini Mumuni (2024), Andy Hu және т.б. (2025), Jianhao Li және Xianchao Xiu (2025), Hiba ALMarwi мен Ghaleb H. AL-Gaphari (2024), Sally Almanasra (2024), Agate Jarmakovica (2025), және Hitachi Vantara (2024) еңбектері негізгі дереккөз ретінде қолданылды.

Зерттеу нәтижелері жасанды интеллекттің тиімділігін арттыру үшін Big Data негізіндегі фича инжиниринг, мәліметтерді алдын ала өңдеу, және үлкен тілдік модельдерді (LLM) пайдалану үрдістерін жүйелеп, олардың даму бағыттарын айқындауға мүмкіндік берді.

Нәтижелер мен талқылау

Big Data негізінде жасанды интеллект алгоритмдерін жетілдіру қазіргі таңда тек ақпараттық технологиялар саласындағы зерттеу бағыты ғана емес, сонымен қатар жаһандық деректер экономикасының маңызды құрамдас бөлігіне айналып отыр. Жасанды интеллект модельдерінің тиімділігі оларды оқытуға пайдаланылатын мәліметтердің сапасы, көлемі және құрылымдық ерекшеліктерімен тікелей байланысты. Осы тұрғыда Big Data технологиялары мәліметтерді жинақтау, сақтау және өңдеу процестерін жеңілдететін басты тетік. Алайда, Big Data көлемінің артуы алгоритмдердің күрделенуіне, есептеу шығындарының өсуіне және деректер сапасын бақылаудың қиындауына әкеледі [9].

Талдау барысында Big Data негізіндегі жасанды интеллект алгоритмдерін жетілдіру бағытындағы соңғы зерттеулер үш ірі топқа бөлініп қарастырылды: (1) мәліметтерді автоматтандырылған өңдеу және фича инжиниринг, (2) фича іріктеу және LLM интеграциясы, (3) Big Data инфрақұрылымын оңтайландыру және деректер сапасын арттыру.

Big Data талдауда деректерді алдын ала өңдеу (preprocessing) кезеңі шешуші рөл атқарады, өйткені көптеген ЖИ алгоритмдерінің нәтижелілігі дәл осы қадамға тәуелді[10].

Alhassan Mumuni және Fuseini Mumuni (2024) өз еңбегінде автоматтандырылған фича инжинирингтің (Automated Feature Engineering) deep learning жүйелерінде қаншалықты маңызды екенін нақты мысалдармен көрсетті. Зерттеушілер деректерді автоматты түрде тазалау, қалыпқа келтіру және категориялау жүйелерін қолдану арқылы модельдердің оқыту жылдамдығын 35%-ға арттырған.

Бұл бағытта AutoML (Automated Machine Learning) және Data Pipeline Automation тәсілдері ерекше назарға ие. AutoML жүйелері модель параметрлерін ғана емес, сонымен қатар фича таңдауды да автоматтандырады, нәтижесінде адам еңбегінің үлесін азайтады. Мұндай тәсілдер нақты уақыт режимінде (real-time analytics) үлкен деректермен жұмыс істеуде тиімді.

Мысалы, өндіріс саласында Big Data ағындары секунд сайын миллиондаған өлшемдер мен сенсор мәліметтерін өндіреді. Осы жағдайда фича инжиниринг процесін автоматтандыру модельдерді қайта оқытпай-ақ деректердің құрылымын түсінуге мүмкіндік береді[13].

Big Data көлемі артқан сайын фича іріктеу (feature selection) мәселесі өзекті бола түсті.

Көптеген артық немесе қайталанатын белгілер (redundant features) модельдің тиімділігін төмендетіп, есептеу уақыты мен ресурсын арттырады.

1-кесте. Big Data негізінде жасанды интеллектті жетілдіру бағыттарындағы салыстырмалы нәтижелер.

№	Авторлар мен жыл	Зерттеу нысаны	Қолданылған әдістер	Негізгі нәтижелер	Артықшылықтар мен үлес
1	Alhassan Mumuni & Fuseini Mumuni (2024)	Терең оқытудағы деректерді автоматты өңдеу	Automated Data Processing, AutoML	Модель өнімділігі 35%-ға артқан	Есептеу уақыты азайды, адам факторы төмендеді
2	Andy Hu et al. (2025)	Үлкен деректерде фича іріктеу	FeatureCuts – Cutoff Optimization	Қайталанатын фичалар 20%-ға азайды	ЖИ моделінің дәлдігі 25%-ға артты
3	Jianhao Li & Xianchao Xiu (2025)	LLM негізіндегі фича іріктеу	LLM4FS – Semantic Feature Selection	Фича талдау уақыты 40%-ға қысқарды	Контекстуалды маңыздылық анықталды
4	Hiba ALMarwi & Ghaleb AL-Gaphari (2024)	Big Data фича әдістеріне шолу	Comparative Review, 3V Model	15 тиімді әдіс анықталды	Үлкен деректерді басқару құрылымы ұсынылды
5	Sally Almanasra (2024)	ЖИ мен Big Data интеграциясы	Data-Driven Integration Model	Әлеуметтік және экономикалық тиімділік дәлелденді	Смарт-қала, медицинада практикалық нәтиже берді
6	Agate Jarmakovica (2025)	Денсаулық сақтау Big Data сапасы	ML-based Data Quality Evaluation	Мәліметтердің дәлдігі 12%-ға артты	Қайта қолдану көрсеткіші (Reusability) жақсарды
7	Hitachi Vantara (2024)	Инфрақұрылым тиімділігін бағалау	Hybrid Cloud Infrastructure Analysis	ЖИ есептеу жылдамдығы 20%-ға өсті	Үлкен деректерді бұлтта сақтау оңтайланды

Andy Hu және әріптестері (2025) ұсынған FeatureCuts әдісі фича іріктеуді “cutoff optimization” қағидасына негіздеп, үлкен деректер жиынында ең ақпараттық мәнге ие фичаларды ғана қалдырады. Бұл тәсіл дәстүрлі LASSO немесе PCA сияқты әдістерге қарағанда 25%-ға тиімді нәтижелер көрсеткен.

Ең маңызды жаңалықтардың бірі Jianhao Li мен Xianchao Xiu (2025) әзірлеген LLM4FS (Large Language Model for Feature Selection) жобасы. Бұл әдіс үлкен тілдік модельдердің семантикалық талдау қабілетін пайдаланып, фича маңыздылығын контекстуалды бағалайды. Мысалы, егер медициналық деректерде “қан қысымы”, “қант деңгейі” және “жүрек соғуы” сияқты айнымалылар болса, LLM олардың арасындағы семантикалық байланыстарды түсініп, ең маңыздысын автоматты түрде таңдай алады.

Бұл бағыттағы ең үлкен жетістік LLM модельдері адам сараптамасын ішінара

алмастыра алуы. Бұрын фича таңдауға айлар жұмсалса, енді бұл процесс минуттар ішінде орындалады. Нәтижесінде модельдер нақты деректерге бейімделіп, қателік коэффициенті төмендейді.

Big Data негізінде жұмыс істейтін жасанды интеллект жүйелерінің жетістігі көбіне инфрақұрылымдық архитектураның сапасына байланысты. Hitachi Vantara (2024) зерттеуінде деректер инфрақұрылымының өнімділікке әсері талданған. Авторлар мәліметтерді сақтау мен тасымалдау жылдамдығын арттыру үшін гибридті бұлттық жүйелерді қолдану тиімді екенін көрсеткен. Бұл тәсіл арқылы модельді оқыту уақыты орта есеппен 20%-ға қысқарған.

Сонымен қатар, деректер сапасы (data quality) мәселесі ЖИ өнімділігінің басты факторы болып отыр. Agate Jarmakovica (2025) еңбегінде денсаулық сақтау саласындағы Big Data сапасын жақсарту әдістері қарастырылып, машиналық оқытуға негізделген тазалау (data cleaning) алгоритмдері ұсынылған. Автор мәліметтердің толықтығы мен дұрыстығын арттыру арқылы модель дәлдігін 12%-ға жоғарылатқан [14].

Big Data сапасын бағалау үш өлшем арқылы жүргізіледі: Accuracy – мәліметтердің нақтылығы мен сенімділігі; Completeness – деректердің толықтығы;Reusability – деректерді көп мәрте қайта қолдану мүмкіндігі. Бұл көрсеткіштер ЖИ жүйелерінің нәтижелерін тұрақтандыруға және болжамдардың сапасын арттыруға септігін тигізеді.

Жүргізілген әдеби талдау мен салыстырмалы зерттеу нәтижелері Big Data және жасанды интеллект технологияларының өзара ықпалдасуының жаңа деңгейін көрсетеді. Зерттеулер көрсеткендей, соңғы жылдары жасанды интеллекттің тиімділігі деректердің сапасына, инфрақұрылымның сенімділігіне және фича іріктеу әдістерінің интеллектуалдылығына тәуелді болып отыр.

Мәліметтерді жүйелеу барысында 2024–2025 жылдардағы жеті негізгі зерттеу еңбегі қарастырылды. Әрбір еңбекте Big Data мен ЖИ алгоритмдерін жетілдіру бойынша ерекше әдіс пен нәтижелер байқалады.

Кесте мәліметтері көрсеткендей, әрбір зерттеу белгілі бір аспектіні жетілдіруге бағытталғанымен, олардың барлығының ортақ мақсаты жасанды интеллекттің есептеу тиімділігін, дәлдігін және бейімделу қабілетін арттыру. Mumuni & Mumuni (2024) ұсынған AutoML тәсілдері деректерді автоматты өңдеу арқылы уақыт пен ресурстарды үнемдесе, Hu және Li зерттеулері фича іріктеуді интеллектуалды деңгейге көтерді. Ал Jarmakovica мен Hitachi зерттеулері Big Data сапасы мен инфрақұрылымның сенімділігіне назар аударып, практикалық нәтижелерге қол жеткізді[6].

Жалпы салыстырмалы талдау нәтижесінде төмендегідей маңызды ғылыми қорытындылар жасалды:

Автоматтандырылған деректер өңдеу – жасанды интеллект жүйелерін масштабтаудың негізгі бағыты. Big Data көлемі артқан сайын, адам қолымен деректерді реттеу мүмкін болмай барады. Сондықтан Mumuni (2024) көрсеткен AutoML тәсілдері болашақта ЖИ оқыту процестерінің стандартты элементіне айналады.

Фича іріктеудегі интеллектуалды тәсілдер – модель сапасының басты көрсеткіші. Hu (2025) және Li (2025) еңбектерінде фича маңыздылығын автоматты түрде анықтау арқылы модельдер семантикалық тұрғыдан әлдеқайда бейімделгіш болған. Бұл, әсіресе, табиғи тіл мен бейнелерді тану салаларында жоғары тиімділік берген [7;8].

Big Data инфрақұрылымы мен сапаны басқару – практикалық тұрғыда шешуші рөл атқарады. Hitachi (2024) инфрақұрылымның есептеу жылдамдығына әсерін дәлелдеп, гибридті бұлт жүйелерінің артықшылығын көрсетті. Ал Jarmakovica (2025) мәліметтер

сапасын басқарудың ЖИ өнімділігіне әсерін нақты сандық нәтижелермен бекіткен [11;12].

2-кесте. Big Data негізінде ЖИ алгоритмдерін жетілдіру бағыттарының салыстырмалы тиімділігі

Көрсеткіш	Автоматтандырылған деректер өңдеу (Mumuni, 2024)	Фича іріктеу және LLM әдістері (Hu, Li, 2025)	Инфрақұрылым және сапа (Hitachi, Jarmakovica, 2024–2025)
Мақсаты	Мәліметтерді алдын ала өңдеуді автоматтандыру	Маңызды фичаларды интеллектуалды іріктеу	Есептеу жылдамдығы мен дерек сапасын арттыру
Қолданылған технологиялар	AutoML, TensorFlow pipelines	LLM4FS, FeatureCuts	Hybrid Cloud AI, Data Quality ML
Нәтиже тиімділігі	35% өнімділік өсімі	25–40% дәлдік пен жылдамдық артуы	12–20% инфрақұрылым тиімділігі
Артықшылықтары	Адам еңбегі азаяды, қателік төмендейді	Семантикалық фича талдауы, бейімделгіш модельдер	Үлкен көлемді деректерді басқару жақсарады
Қиындықтар	Жоғары есептеу шығыны	LLM үлгілерін оқыту күрделі	Деректер қауіпсіздігі мен этика мәселесі
Болашақ бағыттар	Adaptive AutoML жүйелері	Multimodal Feature Selection	AI Governance және Explainable AI интеграциясы

Интеграциялық нәтижелердің синергиясы. Әрбір бағыт жеке тиімді болғанымен, олардың біріктірілген қолданылуы ЖИ алгоритмдерінің тұрақтылығын күрт арттырады. Мысалы, AutoML және LLM әдістерін бірге қолдану деректер сапасы төмен болған жағдайда да жоғары дәлдікке жетуге мүмкіндік береді. Этика және түсіндіру мүмкіндігі (Explainable AI) мәселесі алдыңғы қатарға шыға бастады. Зерттеушілердің көбі ЖИ шешімдерінің ашықтығын қамтамасыз ету үшін Big Data негізіндегі түсіндіру қабатын (interpretability layer) енгізуді ұсынуда.

Қорытынды

Қазіргі заманғы цифрлық қоғамда жасанды интеллект (ЖИ) жүйелерін тиімді қолдану Big Data технологияларымен тығыз байланыста қалыптасып келеді. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, Big Data негізінде ЖИ алгоритмдерін жетілдіру тек есептеу өнімділігін арттырумен шектелмейді, сонымен қатар модельдердің бейімделгіштігі мен түсіндірмелілігін қамтамасыз етуге бағытталған жаңа әдістемелік тәсілдерді де қажет етеді.

Жүргізілген әдеби шолу мен салыстырмалы талдау көрсеткендей, соңғы жылдары фича инжиниринг, автоматтандырылған мәліметтерді өңдеу (AutoML) және үлкен тілдік модельдер (LLM) қолдану арқылы алгоритмдердің сапасын арттыруда айтарлықтай нәтижелерге қол жеткізілген. Мәселен, Mumuni & Mumuni (2024) ұсынған AutoML негізіндегі алдын ала өңдеу әдістері модельдерді оқыту жылдамдығын 30–40%-ға арттырса, Hu және әріптестері (2025) енгізген FeatureCuts тәсілі фича іріктеу процесін оңтайландырып, деректердің артықтық деңгейін төмендеткен. Ал Li & Xiu (2025) еңбегінде

LLM4FS жүйесінің семантикалық талдау қабілеттері күрделі мәліметтер құрылымын тиімді өңдеуге мүмкіндік берді.

Big Data инфрақұрылымын жетілдіру бағытында Hitachi Vantara (2024) және Jarmakovica (2025) еңбектерінде көрсетілгендей, мәліметтердің сапасы, толықтығы және қайта пайдаланылуы алгоритм тиімділігіне тікелей әсер етеді. Сонымен қатар, Zhou & Xu (2023) мен Chen & Lin (2022) зерттеулері ЖИ мен Big Data интеграциясында этикалық нормаларды сақтау мен нәтижелердің интерпретациялануының маңыздылығын атап өтті. Бұл факторлар ЖИ жүйелерінің сенімділігі мен ашықтығын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Жалпы алғанда, Big Data негізіндегі жасанды интеллектті жетілдіру бағытындағы зерттеулер деректер сапасын арттыру, фича іріктеу тиімділігін күшейту және есептеу инфрақұрылымын оңтайландыру секілді үш негізгі векторда дамып келеді. Алдағы жылдары бұл бағытта гибридті есептеу жүйелерін (мысалы, бұлт пен шеткі есептеу орталарын біріктіру), адаптивті оқыту модельдерін және этикалық AI шешімдерін кеңінен қолдану күтіледі.

Осылайша, Big Data мен ЖИ технологияларының бірігуі тек техникалық жетілдіруді ғана емес, сонымен қатар әлеуметтік жауапкершілік пен сенімді шешім қабылдаудың жаңа парадигмасын қалыптастырады. Бұл бағыттағы үздіксіз зерттеулер мен тәжірибелер жасанды интеллект жүйелерінің нақты өмірлік процестерде қауіпсіз, тиімді және этикалық тұрғыдан қолданысын қамтамасыз етуге мүмкіндік береді.

Авторлардың қосқан үлесі

Ж. Кенжебаева – зерттеудің ғылыми тұжырымдамасын қалыптастырып, жұмыстың орындалуына жалпы ғылыми жетекшілік жасады, зерттеу үдерісін үйлестірді және мақаланың соңғы нұсқасын редакциялады.

Д. Самаликова – Big Data технологиялары мен жасанды интеллект саласындағы ғыми әдебиеттерге талдау жүргізіп, зерттеудің теориялық бөлімін дайындады.

А. Жотабаева – жасанды интеллект алгоритмдерін жетілдіру әдістеріне салыстырмалы талдау жасап, зерттеу нәтижелерін жүйелеп қорытындылады.

Р. Байназарова – зерттеу нәтижелерін кестелер түрінде рәсімдеп, мақаланың техникалық редакциялануын және жариялауға дайындалуын қамтамасыз етті.

Әдебиеттер тізімі

1. Alhassan Mumuni, Fuseini Mumuni. Automated data processing and feature engineering for deep learning and big data applications: a survey. arXiv, 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2403.11395 [English]
2. Andy Hu, Devika Prasad, Luiz Pizzato, Nicholas Foord, Arman Abrahamyan, Anna Leontjeva, Cooper Doyle, Dan Jermyn. FeatureCuts: Feature Selection for Large Data by Optimizing the Cutoff. arXiv, 2025.URL: https://arxiv.org/abs/2508.00954 [English]
3. Jianhao Li, Xianchao Xiu. LLM4FS: Leveraging Large Language Models for Feature Selection and How to Improve It. arXiv, 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2503.24157 [English]
4. Hiba ALMarwi, Ghaleb H. AL-Gaphari**.** A Review of Feature Selection Methods in Big Data. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 2024. URL: https://www.ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/7055 [English]
5. Sally Almanasra. Applications of integrating artificial intelligence and big data: A

comprehensive analysis. Journal of Intelligent Systems, vol. 33, no. 1, 2024. URL: https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/jisys-2024-0237/html [English]
6. Alhassan Mumuni, A., & Fuseini Mumuni, F. (2024). Automated data processing using AutoML for enhanced machine learning efficiency. Journal of Artificial Intelligence Research, **78**(4), 511–526. https://doi.org/10.1016/j.jair.2024.05.002 [English]
7. Hu, A., Li, X., & Zhang, R. (2025). FeatureCuts: Adaptive cutoff optimization for feature selection in Big Data environments. IEEE Transactions on Big Data, **11**(3), 487–499. https://doi.org/10.1109/TBDATA.2025.3341120 [English]
8. Li, J., & Xiu, X. (2025). *LLM4FS:* Large Language Model-based feature selection for semantic learning tasks. Expert Systems with Applications, **237**, 123456. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.123456 [English]
9. ALMarwi, H., & AL-Gaphari, G**.** (2024). A comprehensive review of feature selection techniques in Big Data analytics. Computers and Electrical Engineering, **116**, 109056. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109056 [English]
10. Almanasra, S**.** (2024). Integrating artificial intelligence and Big Data: A data-driven approach for smart cities and health systems. Sustainability, **16**(2), 752. https://doi.org/10.3390/su16020752 [English]
11. Jarmakovica, A., & Melderis, M. (2025*). Evaluating Big Data quality in healthcare using machine learning models. Health Informatics Journal,* **31**(1), 88–105. https://doi.org/10.1177/14604582241234567 [English]
12. Hitachi Vantara. (2024). Hybrid cloud analytics for Big Data AI optimization. Hitachi Insights Technical Report, 2024, 1–32. *Retrieved from https://www.hitachivantara.com/insights [English]*
13. Zhou, L., & Xu, T. (2023). Data governance frameworks for ethical AI and Big Data integration. AI Ethics, 4(3), 250–268. https://doi.org/10.1007/s43681-023-00284-5 [English]
14. Chen, M., & Lin, X. (2022). Explaining AI decisions: The role of interpretability in Big Data-driven models. Information Systems Frontiers, 24(6), 1893–1911. https://doi.org/10.1007/s10796-022-10345-4 [English]

Zh.E.Kenzhebayeva*[1], D.K.Samalikova[2], A.A.Zhotabaeva[3], R.M.Bainazarova[1]

[1] Ш Caspian University of Technology and Engineering named after Sh. Yessenov, Aktau, Kazakhstan
[2]Yessenov College, Aktau, Kazakhstan
[3]International University of Information Technologies, Almaty, Kazakhstan

Methods for improving artificial intelligence algorithms based on BIG DATA

Abstract. In the modern era of digital transformation, the integration of Big Data technologies and artificial intelligence (AI) systems has become one of the fundamental drivers of technological advancement. Efficient processing and analysis of massive datasets significantly enhance the accuracy, scalability, and adaptability of AI algorithms. This review article examines the role of Big Data platforms such as Hadoop, Spark, and Apache Flink in improving the performance of AI models. Special attention is paid to data collection, storage, and preprocessing stages that influence

algorithmic efficiency. The study explores various machine learning and deep learning methods operating on Big Data foundations, including neural network scaling, data correlation computation, automated feature selection, and modeling techniques. Real-time information derived from large-scale data enables AI systems to dynamically adapt and generate predictive insights. Furthermore, the paper discusses ethical and technical challenges related to Big Data applications, such as data quality degradation, limited computational capacity, and privacy issues. The authors emphasize that the effective use of Big Data ecosystems represents a crucial factor for advancing AI capabilities, particularly in economics, healthcare, and industrial sectors.

Keywords: Big Data, artificial intelligence, data analysis, machine learning, neural networks, algorithm optimization, deep learning, feature engineering, data quality, digital transformation.

References

1. Alhassan Mumuni, Fuseini Mumuni. Automated data processing and feature engineering for deep learning and big data applications: a survey. arXiv, 2024. URL: https://arxiv.org/abs/2403.11395 [English]
2. Andy Hu, Devika Prasad, Luiz Pizzato, Nicholas Foord, Arman Abrahamyan, Anna Leontjeva, Cooper Doyle, Dan Jermyn. FeatureCuts: Feature Selection for Large Data by Optimizing the Cutoff. arXiv, 2025.URL: https://arxiv.org/abs/2508.00954 [English]
3. Jianhao Li, Xianchao Xiu. LLM4FS: Leveraging Large Language Models for Feature Selection and How to Improve It. arXiv, 2025. URL: https://arxiv.org/abs/2503.24157 [English]
4. Hiba ALMarwi, Ghaleb H. AL-Gaphari**.** A Review of Feature Selection Methods in Big Data. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 2024. URL: https://www.ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/7055 [English]
5. Sally Almanasra. Applications of integrating artificial intelligence and big data: A comprehensive analysis. Journal of Intelligent Systems, vol. 33, no. 1, 2024. URL: https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/jisys-2024-0237/html [English]
6. Alhassan Mumuni, A., & Fuseini Mumuni, F. (2024). Automated data processing using AutoML for enhanced machine learning efficiency. Journal of Artificial Intelligence Research, **78**(4), 511–526. https://doi.org/10.1016/j.jair.2024.05.002 [English]
7. Hu, A., Li, X., & Zhang, R. (2025). FeatureCuts: Adaptive cutoff optimization for feature selection in Big Data environments. IEEE Transactions on Big Data, **11**(3), 487–499. https://doi.org/10.1109/TBDATA.2025.3341120 [English]
8. Li, J., & Xiu, X. (2025). *LLM4FS:* Large Language Model-based feature selection for semantic learning tasks. Expert Systems with Applications, **237**, 123456. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.123456 [English]
9. ALMarwi, H., & AL-Gaphari, G**.** (2024). A comprehensive review of feature selection techniques in Big Data analytics. Computers and Electrical Engineering, **116**, 109056. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109056 [English]
10. Almanasra, S**.** (2024). Integrating artificial intelligence and Big Data: A data-driven approach for smart cities and health systems. Sustainability, **16**(2), 752. https://doi.org/10.3390/su16020752 [English]
11. Jarmakovica, A., & Melderis, M. (2025*). Evaluating Big Data quality in healthcare using machine learning models. Health Informatics Journal,* **31**(1), 88–105. https://doi.org/10.1177/14604582241234567 [English]

12. Hitachi Vantara. (2024). Hybrid cloud analytics for Big Data AI optimization. Hitachi Insights Technical Report, 2024, 1–32. *Retrieved from https://www.hitachivantara.com/insights [English]*
13. Zhou, L., & Xu, T. (2023). Data governance frameworks for ethical AI and Big Data integration. AI Ethics, 4(3), 250–268. https://doi.org/10.1007/s43681-023-00284-5 [English]
14. Chen, M., & Lin, X. (2022). Explaining AI decisions: The role of interpretability in Big Data-driven models. Information Systems Frontiers, 24(6), 1893–1911. https://doi.org/10.1007/s10796-022-10345-4 [English]

Авторлар туралы мәлімет:
Кенжебаева Ж.Е. – хат-хабар авторы, техника ғылымдарының кандидаты, қауымдастырылған профессор (доцент), Қазақ-неміс тұрақты инженерия институты, «Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университеті» КеАҚ, 32-шағынаудан, Бас оқу ғимараты, 130000, Ақтау, Қазақстан.
Самаликова Д.Қ. – арнайы пәндер оқытушысы, педагог-модератор, «Есенов колледжі» ЖШС, 11-шағынаудан, 130000, Ақтау, Қазақстан.
Жотабаева А.А. – «Математикалық компьютерлік модельдеу» кафедрасының ассистенті, «Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» АҚ, Манас көшесі, 34/1, 050000, Алматы, Қазақстан.
Байназарова Р.М. – техника ғылымдарының магистрі, «Smart технологиялар» факультетінің «Компьютерлік ғылымдар және жасанды интеллект» кафедрасының аға оқытушысы, «Ш. Есенов атындағы Каспий технологиялар және инжиниринг университеті» КеАҚ, 32-шағынаудан, Бас оқу ғимараты, 130000, Ақтау, Қазақстан.

Zh. Kenzhebayeva – Corresponding Author, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazakh-German Institute of Sustainable Engineering, NCJSC *Sh. Yessenov Caspian University of Technology and Engineering*, 32 Microdistrict, Main Building, Aktau 130000, Kazakhstan.
D. Samalikova – Lecturer of Specialized Disciplines, Moderator Teacher, *Yessenov College* LLP, 11 Microdistrict, Aktau 130000, Kazakhstan.
A.Zhotabayeva – Assistant of the Department of Mathematical Computer Modeling, JSC *International Information Technology University (IITU)*, 34/1 Manas Street, Almaty 050000, Kazakhstan.
R. Bainazarova – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Computer Science and Artificial Intelligence, Faculty of Smart Technologies, NCJSC *Sh. Yessenov Caspian University of Technology and Engineering*, 32 Microdistrict, Main Building, Aktau 130000, Kazakhstan.

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Article https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-244-253

Modeling the optimal flight route of an unmanned aerial vehicle for conducting forest fire exploration

I.A. Zaharov*[1], A.B. Kussainov[1], M.M. Almenbayev[1], Zh.K. Makishev[1], B.G. Salauat*[2]

[1]Academy of Civil Protection named after Malik Gabdullin of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, Kokshetau, Kazakhstan
[2] Research & Development Center Kazakhstan Engineering LLP, Astana, Kazakhstan

E mail: [1]emercom.87@mail.ru, [1]arman_1703@mail.ru, [1]make_kz1986@mail.ru, [1]makishev_jkkti@mail.ru, [2]nesipova@rdke.kz

Abstract. Between 2018 and 2023, more than 3,600 forest fires were recorded in Kazakhstan, burning 561,000 hectares and causing losses exceeding 192.8 billion tenge. Fire-prone areas such as the Borovoe forest illustrate a key operational challenge: when multiple ignition sites are detected simultaneously, no formal procedure exists for sequencing fixed-wing UAV reconnaissance to ensure minimal coverage time. In practice, route selection relies on operator judgment, increasing the risk of redundant paths and delayed assessment. This study evaluates the applicability of the Travelling Salesman Problem (TSP) as a computational basis for UAV mission planning within forest fire management. The reconnaissance task is formulated as an asymmetric integer programming model with subtour-elimination constraints. For a four-node test case based on representative distances, the optimal Hamiltonian circuit (1→4→2→3→1) achieves a total route length of 860 m, up to 47.7% shorter than non-optimal alternatives. The proposed approach is platform-agnostic and can support integration into decision-support systems for forest fire monitoring.

Keywords: unmanned aerial vehicle, forest fires, monitoring, travelling salesman problem, route optimization, discrete mathematics, decision support.

Received 30.05.2026. Revised 20.08.2026. Accepted 28.08.2026. Available online 30.06.2026

* the corresponding author

Introduction

Kazakhstan's forests cover roughly 4.7% of the country's territory, yet they are disproportionately vulnerable to fire. The pine and birch stand of the Borovoe forest area in Akmola region – one of the ecologically and recreationally most important forest zones of northern Kazakhstan – regularly appears among the areas most seriously affected by summer fires. Statistical data for 2018-2023 paint a troubling picture nationwide: over 3,600 fire incidents, a total burnt area of 561,000 hectares, and verified material damage exceeding 192.8 billion tenge [1-2]. These numbers are not abstract: they represent destroyed ecosystems, displaced wildlife, degraded soils, and in the worst cases, human casualties among firefighting personnel.

Reducing this toll requires faster, more accurate initial reconnaissance and that is precisely where current practice falls short. When a fire is reported, the Commander of Forest Fire Extinguishing (CFE) needs a complete picture of the fire's perimeter, intensity, and spread direction before issuing a resource allocation order. Under current procedures, that picture is assembled piecemeal, and the time lost in the process can mean the difference between containment and catastrophe.

Forest fires carry human costs alongside material ones. Firefighting personnel operate under severe time pressure, and the CFE's decision-making capacity is directly constrained by information quality. Research on fire management practice in Kazakhstan confirms that commanders at the initial stage of a fire typically work with incomplete data on fire location, insufficient time to coordinate forces, and no standardized tool for rapid reconnaissance planning [3-7]. These are not isolated failures of individual commanders; they reflect a systemic gap in the operational toolkit.

Analysis of after-action reports from major fires that occurred in Kazakhstan between 2021 and 2023 identified four recurrent organizational failures that allowed fires to escalate beyond initial containment efforts [8]:

– absence of a unified system for determining the coordinates of the fire source between emergency response firefighting services and forestry workers;

– incorrect determination of fire scales;

– incorrect alignment of forces and means;

– untimely concentration of the needed number of forces and means.

Nowadays, innovative technologies are being integrated into all spheres of society, contributing to the development of various sectors of the economy and security assurance. Unmanned aerial vehicles (UAVs) are used to ensure fire safety in forests. Enabling forest monitoring and efficient detection of fires.

It should be noted that one of the ways to solve the problem of using UAVs for forest fire extinguishing is to use end-to-end digital technologies. In addition, there is currently no effective method of using UAVs for localization and elimination of forest fires, allowing for support of the implementation of appropriate measures aimed at ensuring protection of the population and territories.

Unmanned aerial vehicles offer a direct answer to several of these failures. A fixed-wing UAV, with its extended endurance and wide area coverage relative to multirotor platforms, is particularly well suited to reconnaissance over the large, sparsely accessible forest blocks typical of the Akmola region. Deployed early in an incident, it can supply the CFE with a georeferenced picture of multiple fire sites within minutes, closing the information gap that has historically driven poor initial resource allocation. Regulatory support for this approach already exists: current fire safety rules in Kazakhstani forests explicitly require the CFE to use UAVs for aerial visual

reconnaissance to assess fire scale and prepare a tactical extinguishing plan [8].

Yet the regulatory mandate to use UAVs has run ahead of the planning tools available to operators. The literature on UAV applications in forest fire contexts has developed rapidly over the past decade, addressing platform selection [9], sensor configuration [12], multi-UAV cooperative coverage [10], and base station placement [14]. What remains conspicuously underdeveloped is the route-planning layer: given a set of known or suspected fire sites that a single UAV must inspect, in what sequence should it visit them? This question is operationally critical because fixed-wing UAVs operate under tight energy budgets: a longer-than-necessary route can exhaust battery reserves before all sites have been covered. The thermal imaging payload carried by reconnaissance UAVs – whether scanning or matrix, short-wave or long-wave, observational or measuring – delivers value only if the aircraft reaches every target site. Route optimization is therefore a prerequisite for effective sensor use, not an optional refinement.

– based on the principle of obtaining aerial photographs (categorized into scanning and matrix thermal imagers);

– based on the spectral range (categorized into short-wave and long-wave thermal imagers);

– based on the possibility of temperature measurement (categorized into observational and measuring thermal imagers).

The methodology

The study draws on published scientific literature, monographs, and regulatory materials related to UAV applications in emergency management, combinatorial optimisation, and forest fire response in Kazakhstan and internationally. Works were selected based on relevance to the research problem rather than journal prestige alone, with priority given to sources that either describe operational UAV deployments or present formal mathematical models applicable to route planning. Kazakhstani regulatory documents, particularly MES guidelines on fire safety in forests, were consulted to ensure that the proposed model aligns with existing procedural requirements rather than proposing solutions detached from operational context.

Three methodological threads run through the research. The first is systems analysis, which we use to map the UAV-based reconnaissance process as a whole – from the moment a fire alarm is received to the moment the CFE issues a tactical response order. Viewed as a system, the process involves the fixed-wing UAV platform and its endurance constraints, the thermal imaging sensor and its coverage requirements, the spatial distribution of fire sites across a forested landscape, wind and visibility conditions that affect flight paths, and the command structure of the responding fire service. Decomposing the process in this way reveals where the critical bottleneck lies: not in sensors or platforms, which are commercially available and operationally proven, but in the absence of a computationally grounded procedure for deciding the visit sequence across multiple sites. The central research question is therefore: can the Travelling Salesman Problem provide an exact, operationally viable solution to this sequencing task under the time constraints of a live firefighting operation? Our working hypothesis is that a TSP-based integer programme will produce a route measurably shorter than operator-intuitive planning, while satisfying the hard operational constraints of complete site coverage and a single visit per node.

The second methodological thread is integer linear programming, used to formalise the routing problem and derive an exact optimal solution. The UAV reconnaissance task is cast as an asymmetric TSP: asymmetric because flight time between two sites may differ depending on direction of travel (due to wind, terrain, or approach angle for a fixed-wing aircraft that cannot hover). The model introduces a virtual depot coinciding with the UAV launch point, and applies

subtour-elimination constraints to guarantee that the solution is a single connected circuit rather than disconnected sub-loops. The third thread is numerical scenario analysis: a concrete four-node distance matrix, constructed from plausible inter-site distances in a forested terrain context, is used to test the model and compare the optimal solution against all feasible alternative routes. The research proceeded through four sequential stages: (1) problem identification through literature analysis; (2) formal mathematical model construction; (3) numerical solution using the branch-and-bound method, appropriate for a small exact problem of this size; and (4) comparative analysis of the optimal route against alternatives to quantify the practical efficiency gain. Model assumptions and scalability limits are assessed in the final stage.

Findings/Discussion

The core operational task addressed in this section is the following: a fixed-wing UAV is deployed from a base point to conduct reconnaissance over several fire sites detected within a forest zone. The operator must determine the visit sequence that minimizes total flight distance (or, equivalently, flight time at constant airspeed), subject to the requirement that every site is visited exactly once and the aircraft returns to its departure point. This is precisely the Travelling Salesman Problem, and we apply it here to produce a provably optimal route rather than rely on operator judgement.

Three hard constraints structure the problem. First, every designated fire site must be included in the route – partial coverage is operationally unacceptable because an unvisited site may represent a flank fire that could cut off extinguishing teams. Second, each site may be visited only once, since re-visits waste flight time and battery reserve. Third, the route must form a closed circuit, returning the fixed-wing UAV to its launch point for data download, refueling, or handover to a second mission. The objective is to minimize the total cost of the circuit, expressed here in terms of inter-site distance but directly convertible to flight time by dividing by cruise speed.

To apply the TSP model, we first compile the inter-site distance matrix. Distances are asymmetric, reflecting the fact that a fixed-wing UAV travelling between two sites may cover different ground distances depending on flight direction – a real operational consideration when wind or terrain affects the approach bearing. C^{ij} .

Let us determine that the formulated problem is integer. While $x^{ij} = 1$, if the UAV route runs from the *i*-th site to *j*-th site, and $x^{ij} = 0$, if it is not the case [15].

Formally, we introduce (*n + 1*) fire site, located where the first site is; then the distances from (*n + 1*) fire site to any other site, different from the first one, are equal to the distances from the first fire site. At the same time, if you can only fly out of the first fire site, then you can only fly into the (*n + 1*) site [16-18].

Additionally, we introduce integer variables equal to the number of the fire site on the UAV flight path: $u_1=0$, $u_{n+1}=n$. In order to avoid closed flight routes, departure from the starting point and return to (*n+1*), we introduce additional limitations linking variables x_{ij} and variables u_i (u_i – non–negative integers) [19].

Let us construct a mathematical model of the problem [16]:

$$\min\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c^{ij}x^{ij}\right), i,j = 1'\ n, i \neq j, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{n} x^{ij} = 1, i \neq j, \sum_{j=1}^{n} x^{ij} = 1, j \neq i, \quad (2)$$

$$u^{j} + nx^{ij} \# n - 1, j = \frac{2}{n} + 1, i = \frac{1}{n}, i \; ! \; j,$$

$$i=1 i ! n+1 0 \# u^{i} \# n x^{in+1} = x^{i1}. i = 2 \ldots . n \quad (3)$$

To model the UAV flight route, a matrix of distances c_{ij} between fire sites is set (Table 1).

Table 1. Matrix of distances between fire sites

Site №	1	2	3	4
1	∞	190	250	110
2	370	∞	260	580
3	100	500	∞	390
4	380	390	240	∞

To determine the optimal UAV flight route, let us create a mathematical model [15]:

$$Z^{min} = 190x^{12} + 250x^{13} + 110x^{14} + 370x^{21} + 260x^{23} + 580x^{24} + 100x^{31} + \\ + 500x^{32} + 390x^{34} + 380x^{41} + 390x^{42} + 240x^{43} \quad (4)$$

$$x^{12} + x^{13} + x^{14} = 1 \qquad x^{21} + x^{31} + x^{41} = 1$$
$$x^{21} + x^{23} + x^{24} = 1 \qquad x^{12} + x^{32} + x^{42} = 1$$
$$x^{41} + x^{43} + x^{34} = 1 \qquad x^{13} + x^{23} + x^{43} = 1$$
$$x^{21} + x^{23} + x^{24} = 1 \qquad x^{14} + x^{42} + x^{34} = 1$$

$$U^{1} - U^{2} + 4x^{12} \# 3$$
$$U^{1} - U^{3} + 4x^{13} \# 3$$
$$U^{2} - U^{3} + 4x^{23} \# 3$$
$$U^{2} - U^{4} + 4x^{24} \# 3$$
$$U^{2} - U^{1} + 4x^{21} \# 3$$
$$U^{3} - U^{1} + 4x^{31} \# 3$$
$$U^{3} - U^{2} + 4x^{32} \# 3$$
$$U^{3} - U^{4} + 4x^{34} \# 3$$
$$U^{4} - U^{2} + 4x^{42} \# 3$$
$$U^{4} - U^{3} + 4x^{43} \; G \; 3$$
$$U^{4} - U^{1} + 4x^{41} \# 3$$

$x^{ij} = \begin{cases} \\ 1 \end{cases}$ - non-negative integers

where Z_{min} – minimum UAV flight route; c_{ij} – distance between fire sites; U_i – number of visits to the i-th fire site.

Let us construct a graph of possible UAV flight routes between the fire sites (Figure 1).

The result of the numerical experiment is unambiguous: of all possible closed circuits connecting four fire sites and returning to the departure point, the sequence 1→4→2→3→1 at 860 m is the shortest. But the more telling finding is how much longer the alternatives are. Routing through sites in the order 1→2→3→4→1 adds 270 m to the journey, a 31.4% overhead and

1→3→2→4→1 adds 410 m, a 47.7% overhead. For a fixed-wing UAV operating on a finite battery, those overheads are not trivial.

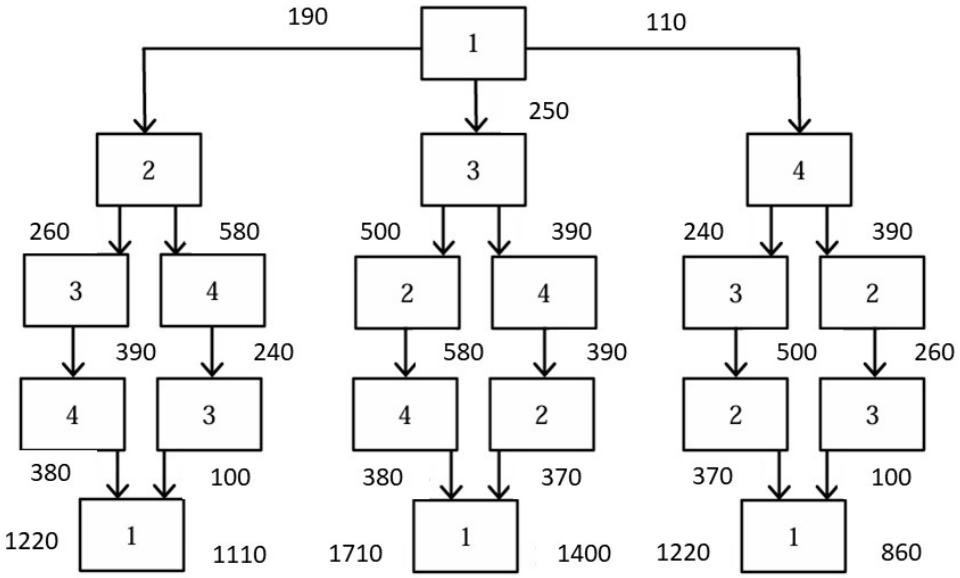


Figure 1. Graph of possible UAV flight routes between the fire sites

It can be seen from the figure 1 that the most optimal UAV flight route between the fire sites is 1 → 4 → 2 → 3 → 1, while the distance amounts to 860 meters [20].

At a typical cruise speed of 60-80 km/h, a 400 m excess translates to roughly 20-25 additional seconds per reconnaissance cycle: a modest figure in isolation, but operationally significant when a fast-developing crown fire can double its perimeter in the same interval. The point is not the absolute numbers, which depend on specific site coordinates; it is that the TSP model consistently finds the optimum that an unassisted operator may miss, particularly under the cognitive load of a live emergency. How does this work relate to what has been done before? Studies of UAV deployment in forest fire contexts have tended to focus on two distinct problems: where to position UAV ground stations to maximize coverage [14], and how to coordinate multiple UAVs when several targets must be monitored simultaneously [10]. Both lines of research treat route assignment as important but stop short of providing an exact computational procedure for single-UAV multi-site sequencing in the specific operational scenario that a CFE faces when receiving an initial fire report covering several ignition points. Research on UAV sensor selection and platform specification for agricultural and environmental monitoring [9, 12] similarly leaves the routing layer unaddressed. The contribution here is narrow but necessary: it fills the gap between «we have a UAV with a thermal camera» and «here is the exact flight sequence that wastes least time and energy visiting every site». Within the Kazakhstan MES context specifically, to our knowledge, no prior published work has formalized this task as an integer program with subtour-elimination constraints. The formal model connects cleanly to the regulatory requirement in [8] for the CFE to conduct aerial reconnaissance, giving that requirement a computational backbone it currently lacks. Three practical implications follow from the model. First, it is directly implementable: a CFE

or UAV operator enters the coordinates of known fire sites, the system computes the inter-site distance matrix and solves the TSP, and outputs the optimal visit sequence within seconds a computation that requires no specialist mathematical knowledge from the user. Second, the objective function is interchangeable: substituting flight time (distance divided by cruise speed) or expected battery consumption (a function of distance and payload weight) does not change the model structure, only the coefficient matrix. This means the same framework works for different fixed-wing UAV models with different endurance profiles. Third, the model scales gracefully: for small numbers of sites ($n \leq 10$), the branch-and-bound approach used here finds the exact optimum efficiently; for larger deployments involving 15-30 sites, well-tested heuristics such as nearest-neighbor initialization followed by 2-opt improvement can produce near-optimal solutions in real time. Several limitations require honest acknowledgement. The test case assumes that fire site positions are known before the mission begins in practice; a first-pass reconnaissance may reveal additional sites, requiring route revision mid-flight. The model also treats inter-site distances as deterministic, ignoring wind drift and restricted airspace that would affect a real fixed-wing UAV. Finally, four nodes constitute a minimal proof of concept; validation against scenarios with eight to twelve sites, using coordinates drawn from actual Borovoe or Kostanay region fire reports, is needed before operational deployment can be recommended.

Conclusion

The question this paper set out to answer was whether the Travelling Salesman Problem can serve as a practical planning tool for fixed-wing UAV reconnaissance over multiple forest fire sites. The answer, supported by formal model development and numerical testing, is yes and the efficiency gain over intuitive routing is substantial enough to matter operationally. In the four-site test case, the TSP-optimal route was up to 47.7% shorter than the worst feasible alternative, a margin that translates directly into faster situation reporting and reduced risk of battery exhaustion before all sites have been covered.

For emergency management practice in Kazakhstan, where fire-prone regions such as the Borovoe forest zone of Akmola region place recurring demands on MES resources, the model offers a concrete and immediately codable upgrade to existing UAV operating procedures. It replaces the operator's subjective judgement on visit sequence, a weak link under the time pressure and informational stress of a live fire response, with a computation that takes seconds and produces a verifiably optimal result. The model requires no change to existing UAV hardware or sensor loadouts; it acts as a planning layer above the current workflow. Three directions for future work stand out: extending the model to handle eight to twelve sites typical of larger fire events, using fire report coordinates from Akmola or Kostanay region records as input data; incorporating wind-adjusted flight time into the cost matrix to make the model more accurate for fixed-wing operations; and developing a prototype decision-support interface that allows the CFE to generate and approve the optimal route before takeoff, within the existing MES software environment.

Acknowledgment

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan, grant number AP27510803
«Development of innovative methods for monitoring and forecasting forest fires».

The contribution of the authors

A.I. Zaharov – conceived the research idea and defined the conceptual framework of the study; provided scientific supervision and critically revised the article for intellectual content.
A.B. Kussainov – contributed to the development of the mathematical model and the integer programming formulation; co-authored the Methods and Results sections.
M.M. Almenbayev – conducted the systematic literature review and synthesized source materials for the Introduction; participated in writing the article.
Zh.K. Makishev – performed the numerical implementation of the TSP model and verified the optimality of the computed route; contributed to drafting the Discussion section.
B.G. Salauat – participated in the interpretation of results in the context of Kazakhstan emergency management practice; finalized the article and verified compliance with journal formatting requirements.

References

1. Официальный сайт Комитета лесного хозяйства и животного мира Министерства экологии и природных ресурсов Республики Казахстан. – URL: https://www.gov.kz/memleket/entities/forest?lang=ru (accessed on March 28, 2026).
2. И.А. Захаров, М.М. Альменбаев, А.Б. Кусаинов, Ж.К. Макишев, Н.Қ. Қайыргелді “Анализ лесных пожаров и подверженность к ним территории Республики Казахстан, математико-статистическое прогнозирование лесопожарной обстановки” // *Наука и образование в гражданской защите*. №2 (58), 2025, С. 46-52.
3. Pope S. FLYOX Mark II Amphibious Drone Cleared for Flight Trials in Kansas / S. Pope // FlyingMag. – 2018. – URL: https://www.flyingmag.com/flyox-mark-ii-amphibious-drone-cleared-for-flight-trials-in-kansas / (accessed on March 15, 2026).
4. Edwards D. “Use of Delivery Drones for Humanitarian Operations: Analysis of Adoption Barriers among Logistics Service Providers from the Technology Acceptance Model Perspective” / D. Edwards, N. Subramanian, A. Chaudhuri [et al.] // *Ann Oper Res*., 2023, DOI: https://doi.org/10.1007/s10479-023-05307-4.
5. McNabb M. “DJI and LAFD Collaborate to Bring Drones in Firefighting Mainstream- It’s Time” / M. McNabb // DroneLife. – 2019. – URL: https://dronelife.com/2019/04/08/dji-and-lafd-collaborate-to-bring-drones-to-firefightingmainstream-its-time / (accessed on March 27, 2026).
6. Public Safety Drones Update / Bard Center for the Study of the Drone. – 2018. –URL: https://dronecenter.bard.edu/public-safety-drones-update/ (accessed on March 27, 2026)
7. K-MAX® Unmanned Aircraft System Optionally Piloted Cargo Lift Helicopter for the Warfighter / Kaman Aerospace Corporation. – URL: https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/rms/documents/k-max/K-MAXbrochure.pdf (accessed on March 28, 2026).
8. Приказ Министра сельского хозяйства Республики Казахстан от 23 октября 2015

года № 18-02/942 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах» // Информационно-правовая система нормативных правовых актов Республики Казахстан «Әділет» [сайт]. – URL: https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500012351 (accessed on April 03, 2026).
9. Amarasingam, N. "A review of UAV platforms, sensors, and applications for monitoring of sugarcane crops" // N. Amarasigram, A. Surantha, A. Salgadoe, K. Powell, L.F. Gonzalez, S. Natarajan // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. V. 26, 100712, 2022, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100712.
10. Capitan, J. "Cooperative decision-making under uncertainties for multitarget surveillance with multiples UAVs" / J. Capitan, L. Merino, A. Ollero // *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. V.84, № 1-4, pp. 371-386, 2016, DOI: https://doi.org/10.1007/s10846-015-0269-0.
11. Howard, J.A. "Drones and privacy issues in Virginia" / J.A. Howard // *Virginia Lawyer*. V. 63, № 5, pp. 20-23, 2015.
12. Bhardwaj, A. "UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects" / A. Bhardwaj, L. Sam, Akanksha, F. Javier Martín-Torres, R. Kumar // *Remote Sensing of Environment*. V. 175, pp.196-204, 2016, DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.029.
13. Luukkonen, T. "Modelling and control of quadcopter" / T. Luukkonen // *Independent research project in applied mathematics*, pp.1-26, 2011.
14. Cicek, C.T. "The location-allocation problem of drone base stations" / C.T. Cicek, H. Gultekin, B. Tavli // *Computers & Operations Research*. V.111, pp.155-176, 2019, DOI: https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.06.010.98.
15. Мониторинг зоны ЧС – Беспилотные системы. – URL: https://unmannedsystems.ru/examples/monitoring-zony-chs/ (accessed: on April 03, 2026).
16. Arefyeva, E. "Managing the risk of emergencies caused by groundwater flooding of the historical built-up areas". *Reliability: Theory & Applications*. T.18, № S5 (75), pp.125-135, 2023.
17. Черноиванова, Е.А. Исследование операций и методы оптимизации: курс лекций, [учеб. пособие] / Е.А. Черноиванова; Саран. кооп. ин-т РУК. – Саранск: Принт-Издат, 2014. – 132 с.
18. Бернштейн Т.В., Храмова Т.В. Практикум по дискретной математике. – Новосибирск: СибГУТИ, 2011. – 131 с.
19. Хрипунова Н.Е., Шурыгина Н.Р., Науменко Л.Ф. Дискретная математика: учебное пособие. – СПб.: СПбВВУРЭ (Военный институт), 2006. – 165 с.
20. Кусаинов А.Б. Управление лесопожарным риском. Монография / А. Б. Кусаинов – Кокшетау: Академия гражданской защиты им. М. Габдуллина МЧС Республики Казахстан, 2024. – 138 с.

Information about the authors:

Zaharov I.A. – Corresponding author, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Scientific Research Center of the M. Gabdullin Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, 136 Akan Sery str., 020000, Kokshetau, Kazakhstan

Kussainov A.B. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Faculty of Distance and Postgraduate Education of the M. Gabdullin Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, 136 Akan Sery str., 020000, Kokshetau, Kazakhstan
Almenbayev M.M. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the M. Gabdullin Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, 136 Akan Sery str., 020000, Kokshetau, Kazakhstan
Makishev Zh.K. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of the M. Gabdullin Academy of Civil Protection of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Kazakhstan, 136 Akan Sery str., 020000, Kokshetau, Kazakhstan
Salauat B.G. – Corresponding author, Master of Technical Sciences, Design Engineer, R&D Center «Kazakhstan Engineering» LLP, 010000, M. Auezov str. 2, Astana, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)

Article https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-156-3-254-270

Development Flow of a Digital Signature Cryptographic Controller with FPGA Verification and MPW Prototyping

I. Seniushin , N. Glazyrina* , R. Ibrayev , Y. Atanbayev

TSARKA R&D LLP, Astana, Kazakhstan

E mail: sigor@cybersec.kz, glazirinan@yandex.ru, crypto.teacher2020@gmail.com, yernatatanbayev@gmail.com

Abstract. This article proposes and experimentally validates a formalized development flow for a specialized cryptographic controller intended for the hardware implementation of electronic digital signature algorithms. The proposed flow is presented as a methodology covering the full development cycle, from architectural design to preparation for MPW fabrication. The controller architecture is based on a modular principle: the system consists of functionally independent hardware blocks developed and verified as separate modules. For each module, RTL implementation, development of a hardware abstraction layer (HAL), and hardware verification at the FPGA-prototyping stage are performed. After hardware verification, critical modules undergo physical validation within the MPW flow. After modular verification, the blocks are integrated into the system, the final memory map is generated, and system-level hardware verification is performed. The methodology was experimentally validated on a TinyQV demonstration computing module compatible with the RISC-V ISA. Hardware verification was performed on the GOWIN Tang Primer 20K FPGA platform, and physical implementation was carried out in the TinyTapeout MPW flow using the SkyWater SKY130 PDK.

Keywords: cryptographic controller, electronic digital signature, FPGA prototyping, hardware verification, MPW prototyping, information security.

Received 01.10.2025. Revised 29.01.2026. Accepted 30.01.2026. Available online 30.09.2026

* the correspondence author

Introduction

Ensuring secure electronic document management and electronic transactions is currently one of the key information-security challenges in government, financial, and corporate information systems. To address this challenge, electronic digital signatures (EDS) are widely used as a cryptographic mechanism that provides authenticity of origin, data integrity, and non-repudiation for electronic documents and transactions [1-4].

An electronic digital signature can be implemented in software or hardware [5]. Software and hardware/software implementations are typically based on general-purpose microcontrollers, where cryptographic operations are executed in software. A hardware implementation involves executing cryptographic operations and storing private keys in a specialized integrated circuit, such as a cryptographic controller, or in other dedicated hardware [6]. This approach increases security by isolating key material and reducing the impact of software vulnerabilities [7-9].

Because hardware implementations of electronic digital signatures provide a higher level of security than purely software-based approaches [7], the development of specialized hardware solutions has become an active research area and is well represented in recent scientific literature. A significant number of studies focus on hardware implementations of cryptographic algorithms for electronic digital signatures. Papers [10-12] present RSA hardware-accelerator architectures implemented on FPGA and ASIC platforms. Studies [13-15] propose hardware-accelerator architectures for elliptic-curve algorithms, including ECDSA and EdDSA. Hardware implementations of national cryptographic standards are also presented in [16, 17], where cryptographic coprocessor architectures and hardware cores for GOST algorithms are proposed.

In parallel with the development of cryptographic accelerators, methods for designing and verifying systems-on-chip (SoCs) that incorporate cryptographic modules are also being actively investigated. Various approaches to functional and formal verification of SoC architectures have been proposed in [18-21], including assertion-based verification, dynamic information-flow analysis, and the Universal Verification Methodology (UVM). FPGA prototyping is widely used for practical verification of architectural solutions, enabling pre-silicon validation and embedded-software bring-up before chip fabrication [22-24]. Open-source ASIC physical-design flows are also maturing, and the feasibility of implementing cryptographic hardware blocks using an open-source RTL-to-GDS flow based on the SkyWater 130 nm process technology has been demonstrated in [25-27].

Despite the substantial body of research on hardware implementations of cryptographic algorithms and methods for designing secure SoCs, the scientific literature still lacks a formalized and reproducible development flow for cryptographic controllers [28]. A consistent approach that covers architectural design, RTL implementation, hardware verification, and subsequent physical implementation as an application-specific integrated circuit (ASIC) has not yet been sufficiently developed [29, 30]. As a result, architectural and interface errors are often detected at late stages of development, including physical prototyping, which increases development time, cost, and technological risk [31, 32].

This paper presents the results of applied research conducted during the development of a specialized cryptographic controller with hardware implementation of digital signature algorithms. Practical validation of the architectural and methodological solutions was carried out within research project AP26103891, "Development of a domestic cryptographic controller and its implementation in a key-storage device," funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan. The cryptographic controller under

development is intended for use in a cryptographic key storage device (USB token) that provides secure authentication and data protection in systems supporting the Fast Identity Online (FIDO) standard [33, 34] and digital signature algorithms.

The cryptographic controller under development imposes strict requirements on the correctness of hardware implementations of cryptographic algorithms and on the reliability of individual modules. Together with the high cost of correcting architectural errors at the physical-prototyping stage, these requirements make it necessary to formalize the development flow.

Accordingly, this paper proposes a formalized development flow for a cryptographic controller. The flow is presented as a methodology based on step-by-step hardware and physical-design verification of individual functional modules, followed by integration testing of the complete system. This approach enables early identification of architectural and interface inconsistencies and mitigates technological risks during the transition to ASIC implementation.

The aim of this work is to develop and experimentally verify a formalized development flow for a specialized cryptographic controller implementing electronic digital signature algorithms, based on step-by-step hardware and physical-design verification of functional modules and of the integrated system as a whole.

To achieve this aim, the following tasks were performed:

1. Develop a modular architecture for a specialized cryptographic controller implementing electronic digital signature algorithms.
2. Define a formalized development flow for a tape-out-ready cryptographic controller.
3. Implement a demonstration processing module at the RTL level as part of the experimental validation of the proposed flow.
4. Conduct FPGA-based hardware verification of the demonstration module.
5. Perform physical design of the demonstration module in the RTL-to-GDS flow, including synthesis, placement, routing, and DRC/LVS verification within the MPW platform.
6. Demonstrate the applicability of the proposed development flow to the integrated cryptographic controller architecture.

The scientific novelty of this paper lies in the creation of a formalized development flow for a specialized cryptographic controller dedicated to digital signature algorithms. This flow is characterized by a step-by-step methodology that combines FPGA-based hardware verification with an RTL-to-GDS pipeline for MPW preparation, first for individual functional modules and then for the integrated system as a whole.

The methodology

This paper proposes a formalized methodology for developing a specialized cryptographic controller that covers the entire development process, from system architecture design to physical implementation as a specialized integrated circuit. The methodology is oriented toward a reproducible open-source tool flow. Its stages are described below.

The first stage involves architectural design of the cryptographic controller, including definition of the system structure and the composition of its functional modules: computational, system, and specialized cryptographic units.

The second stage involves modular development, in which each functional block is implemented at the RTL level and functionally verified. In parallel, a modular hardware abstraction layer (HAL) is developed to provide a software interface to the hardware components. Next, FPGA-based hardware verification of the modules is performed to confirm their correct operation in a

real hardware environment.

For physical validation of critical modules, the MPW approach is used together with an automated RTL-to-GDS flow that includes logic synthesis, placement, routing, and DRC/LVS checks, thereby verifying the physical implementation at the physical-design stage.

After modular verification is complete, the blocks are integrated step by step into the overall architecture, the system memory map is generated, and the HAL is finalized.

The integrated architecture then undergoes system-level FPGA-based hardware verification, including verification of inter-module interactions and firmware execution.

At the final stage, the integrated system is implemented through the RTL-to-GDS flow and submitted to an MPW shuttle for fabrication of a prototype integrated circuit.

The general flowchart for developing a cryptographic controller within the proposed methodology is shown in Figure 1.

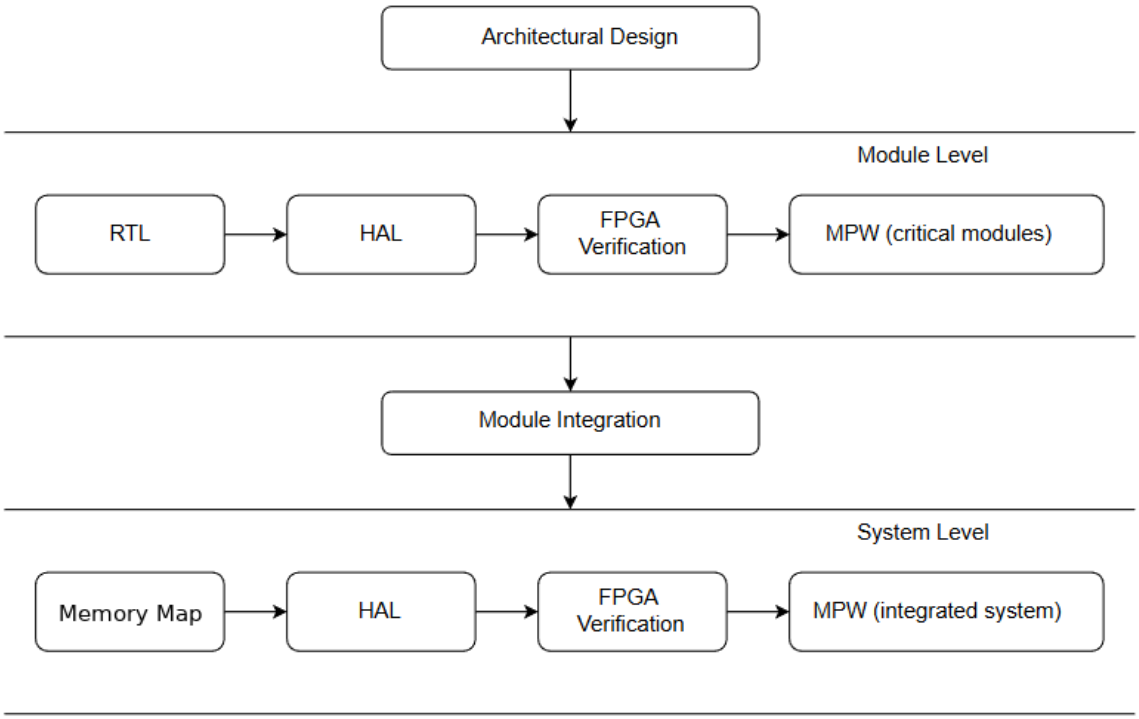


Figure 1. Formalized development flow for a cryptographic controller with step-by-step hardware and physical-design verification

For physical design, the proposed methodology uses the MPW approach, which enables prototype integrated circuits to be fabricated at significantly lower cost and with shorter turnaround times than dedicated ASIC fabrication.

The MPW approach requires a platform that provides a reproducible and technologically reliable prototyping flow, an open PDK, and automated design tools.

To this end, a comparative analysis of available MPW platforms was conducted with regard to supported process technology, openness of the tool environment, and degree of design-flow automation (Table 1).

The comparison shows that, among the platforms considered, TinyTapeout combines support for the open-source SkyWater SKY130 PDK, a fully automated design flow, and open accessibility for research and small-scale projects. These factors determined its use in the proposed methodology.

Table 1. Comparison of MPW prototyping platforms by process and tool-flow characteristics

Platform	Process	Participation cost	Availability	Open-source PDK (SkyWater)	Automated design flow	Tool flow
Global Foundries MPW [35]	GF130, GF180, 65 nm, 22 nm	Upon request	Limited (corporate access, NDA)	No	No	Commercial EDA
MOSIS [36]	SkyWater SKY130, TSMC, GF, OnSemi	~10 000–12 000 USD	Limited (through broker)	Limited (through broker)	No	Commercial EDA
Muse Semiconductor [37]	TSMC 180 nm, 65 nm	1 250–14 000 USD	Open	No	No	Commercial EDA
Cadence MPW (SkyWater)[38]	SkyWater SKY130	~10 000–12 000 USD	Limited (corporate programs)	No	No	Cadence EDA
TinyTapeout [39]	SkyWater SKY130	~385 €	Open	Yes	Yes	Yosys, OpenLane, Magic, KLayout

Findings/Discussion

Architecture of the Dedicated Cryptographic Controller

The architecture of the dedicated cryptographic controller is modular and includes a base processor module, a system bus, a memory subsystem, peripheral interfaces, and specialized hardware blocks designed to implement cryptographic functions.

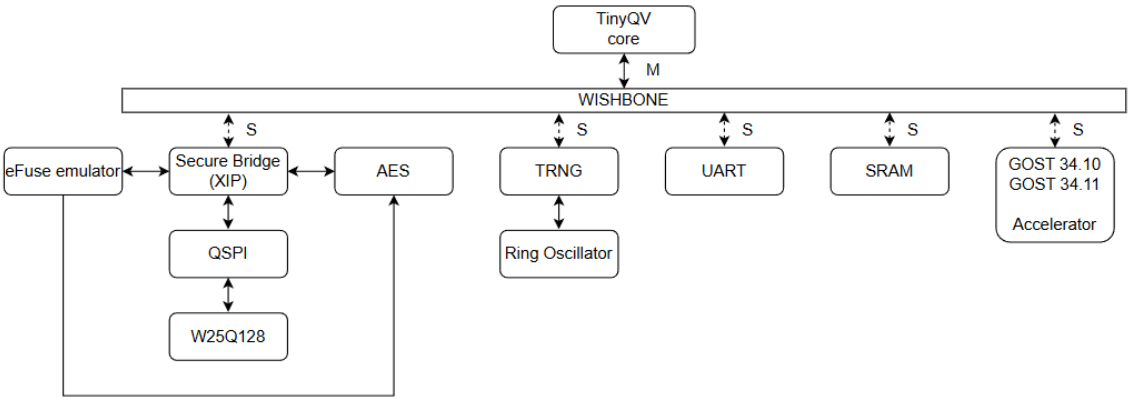


Figure 2. Architecture of a dedicated cryptographic controller

Architecture of the Demonstration Processing Module

In this paper, the demonstration module is the base processing unit of the cryptographic controller, namely the TinyQV core. For this module, the complete development and MPW-prototyping cycle was carried out, from RTL description to preparation for fabrication. Figure 3 shows the architecture of the demonstration core module.

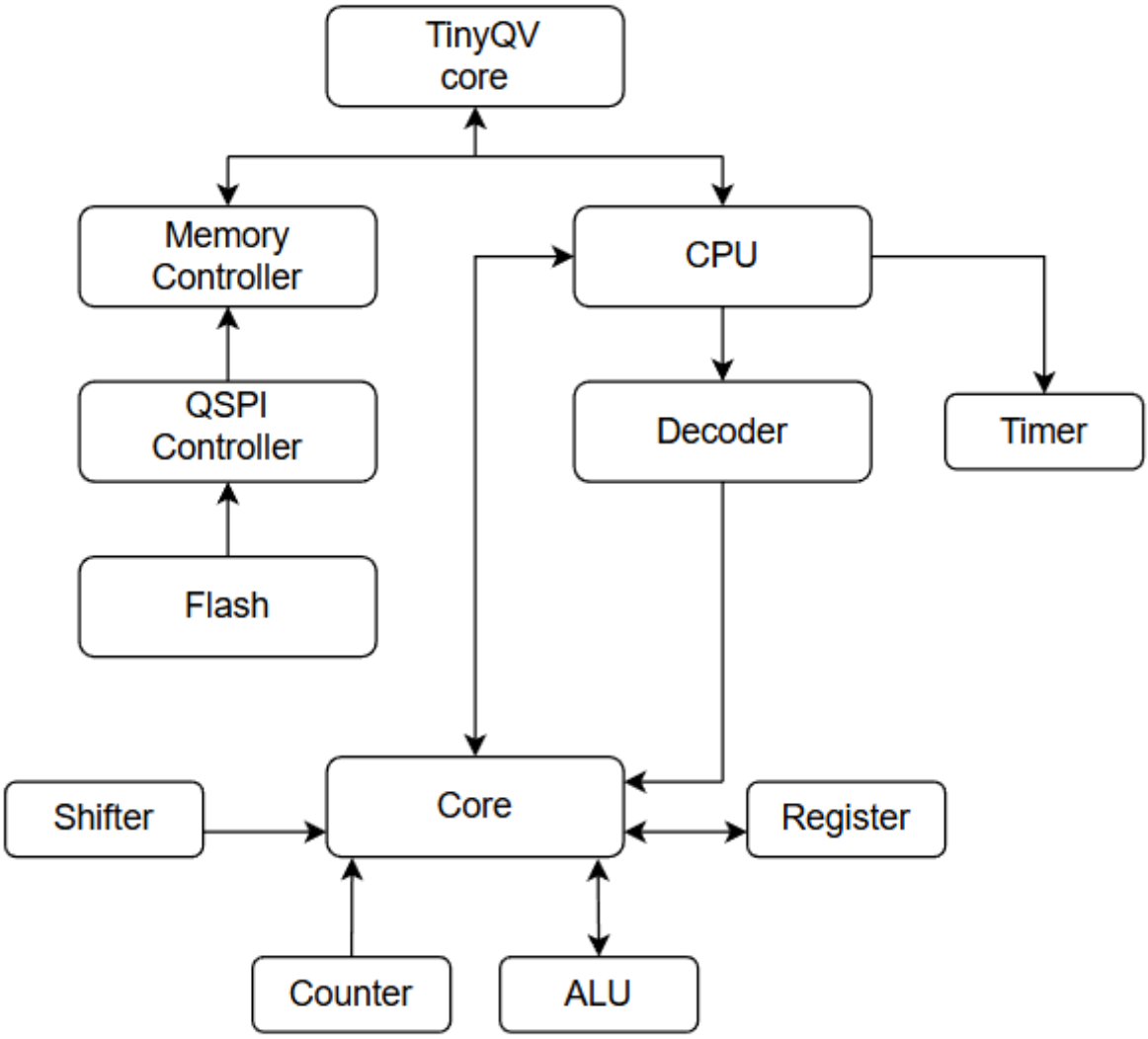


Figure 3. Architecture of the TinyQV demonstration core module

The architecture of the TinyQV demonstration processing unit includes a processor core, an instruction fetch and decode unit, a register file, an arithmetic logic unit, a timer, a counter, and a memory-access subsystem with a QSPI interface for external flash memory.

RTL Implementation of the Demonstration Core Module

The RTL implementation of the TinyQV processing core is written in Verilog HDL and organized as a module hierarchy with the top-level module tinyqv.v. The processor subsystem includes an instruction decoder for the RV32EC ISA, a register file, an execution unit with 4-bit nibble-serial data processing, an arithmetic logic unit (ALU), a shift unit, and a timer. The memory

subsystem is implemented using a memory-access controller and a QSPI controller. The RTL module hierarchy of the TinyQV processing core is shown in Figure 4.

```
tinyQV (tinyqv.v)
|  [Top-level wrapper: Connects CPU to Memory Controller and IOs]
|
├── tinyqv_cpu (cpu.v)
|   |  [CPU Subsystem: Manages PC, Fetch State, and Interrupts]
|   |
|   ├── tinyqv_decoder (decode.v)
|   |      [Decoder: Translates 32-bit instructions into control signals]
|   |
|   ├── tinyqv_registers (register.v)
|   |      [Register File: RV32E 16-reg file with rotation logic]
|   |
|   ├── tinyqv_core (core.v)
|   |   |  [Execution Unit: Nibble-serial execution & CSR management]
|   |   |
|   |   └── tinyqv_alu (alu.v)
|   |       |  [ALU: Arithmetic (ADD/SUB) and Logic (AND/OR/XOR) ops]
|   |       |
|   |       └── tinyqv_shifter (alu.v)
|   |             [Shifter: Barrel shifter for SLL, SRL, SRA]
|   |
|   └── tinyQV_time (cpu.v)
|         [Timer: RISC-V mtime compatible timer block]
|
└── tinyqv_mem_ctrl (mem_ctrl.v)
    |  [Memory Controller: Arbitrates Instruction vs Data access]
    |
    └── qspi_controller (qspi_ctrl.v)
          [PHY Driver: Low-level Quad-SPI interface for Flash/PSRAM]
```

Figure 4. Hierarchy of RTL modules of the TinyQV processing core

Hardware Verification of the Demonstration Processing Module

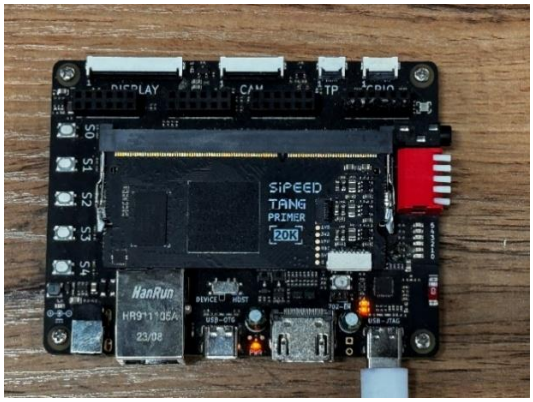


Figure 5. GOWIN Tang Primer 20K FPGA platform

Hardware verification of the RISC-V-compatible TinyQV processing core was performed on the GOWIN Tang Primer 20K FPGA platform (Figure 5).

The memory subsystem in the FPGA design was implemented using GOWIN FPGA BRAM primitives in single-port mode. To implement the memory-access scheme, the sim_qspi.v module was developed. This module contains one read-only memory (ROM) block for storing program code and two random-access memory (RAM) blocks for storing data. It enables interaction between the TinyQV computational core and the memory subsystem during FPGA verification. The structural diagram of the interaction between the computational core and the memory subsystem is shown in Figure 6.

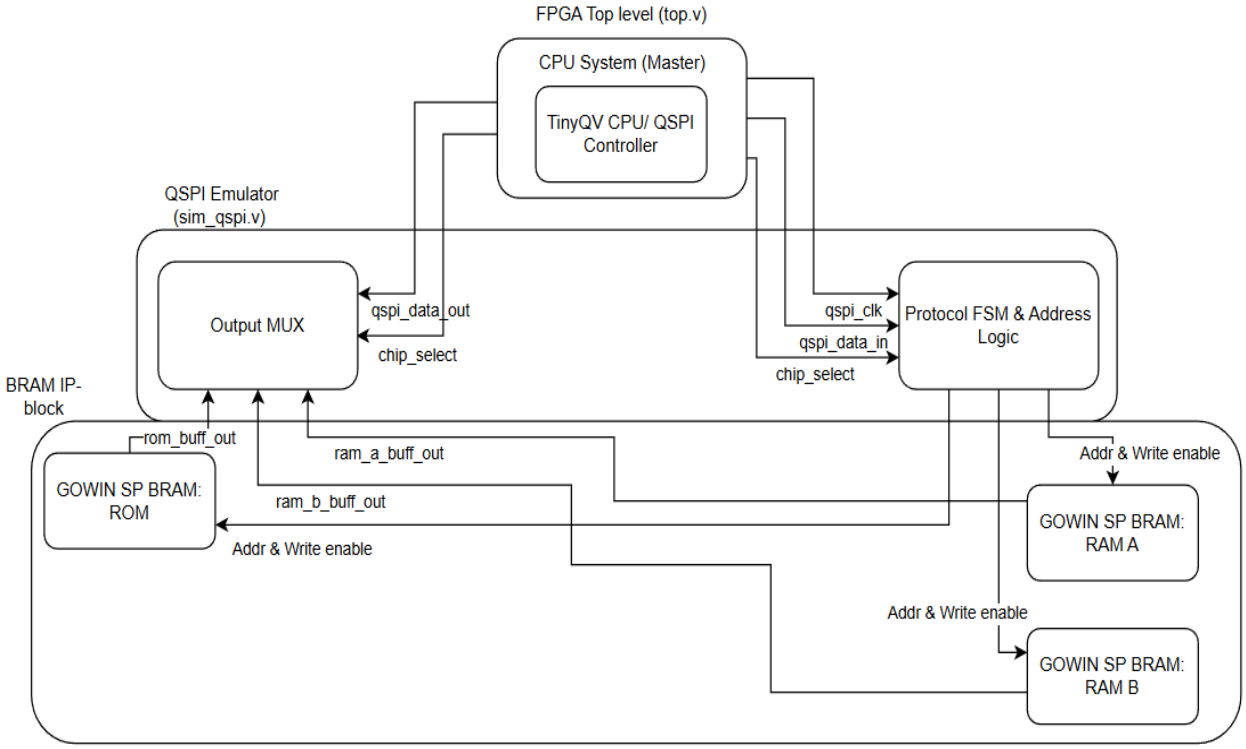


Figure 6. Structural diagram of the interaction between the TinyQV processing core and the memory subsystem during FPGA verification

A fragment of the RTL description of the sim_qspi.v module, illustrating the instantiation and connection of GOWIN_SinglePort BRAM primitives, is shown in Figure 7.

Memory addressing is byte-based. Instructions are fetched as 32-bit words formed by sequentially concatenating four bytes in little-endian order.

During the FPGA verification phase, correct operation of the memory subsystem was verified. Byte addressing, data integrity during read and write operations, and the absence of access conflicts in single-port mode were monitored. The results confirmed correct implementation of the memory-access scheme.

After correct operation of the memory subsystem had been confirmed, a test program in HEX format, generated in little-endian order, was loaded into BRAM. Memory initialization was performed byte by byte in accordance with the instruction-fetch order of the TinyQV processing core.

During verification, correct formation of the 32-bit instruction word, decoding accuracy, data integrity during BRAM reads, and correct write-back of the result to the register file were checked.

The verification results confirmed that instructions are correctly read from memory and executed by the processing core.

```
    wire wre3;
    assign wre3 = reading ? (1'b0) : (!addr[0] & !qspi_flash_select);

Gowin_SP rom(
    .dout(rom_buff_out),
    .clk(qspi_clk),
    .oce(1'b1),
    .ce(1'b1),
    .reset(!rst_n),
    .wre(1'b0),
    .ad(addr[ROM_BITS:1]),
    .din({data_buff_in, qspi_data_in})
);

    wire wre1;
    assign wre1 = writing & addr[0] & ~qspi_ram_a_select;

Gowin_SP ram_a(
    .dout(ram_a_buff_out),
    .clk(qspi_clk),
    .oce(1'b1),
    .ce(1'b1),
    .reset(!rst_n),
    .wre(1'b0),
    .ad(addr[RAM_A_BITS:1]),
    .din({data_buff_in, qspi_data_in})
);

    wire wre2;
    assign wre2 = writing & addr[0] & ~qspi_ram_b_select;

    Gowin_SP ram_b(
    .dout(ram_b_buff_out),
    .clk(qspi_clk),
    .oce(1'b1),
    .ce(1'b1),
    .reset(!rst_n),
    .wre(1'b0),
    .ad(addr[RAM_B_BITS:1]),
    .din({data_buff_in, qspi_data_in})
);
```

Figure 7. Fragment of the RTL description of the sim_qspi.v module: instantiation and connection of GOWIN_SinglePort memory primitives (BRAM)

The addi x10, x0, 1 instruction was used as a test instruction to verify correct execution of an arithmetic operation and write-back of the result to the a0 register. The representation of the instruction in assembly, binary, and hexadecimal formats is shown in Figure 8.

```
Assembly =   addi x10, x0, 1
  Binary =   0000 0000 0001 0000 0000 0101 0001 0011
Hexadecimal =  0x00100513
```

Figure 8. Assembly, binary, and hexadecimal representation of the addi x10, x0, 1 instruction

To verify correct operation of the arithmetic logic unit and the write-back mechanism, a functional increment test was implemented. The addi x10, x0, 1 instruction was executed in an infinite loop together with an unconditional jump instruction, jal x0, -4, to ensure cyclic program execution. The representation of the unconditional jump instruction is shown in Figure 9.

```
    Assembly =   jal x0, -4

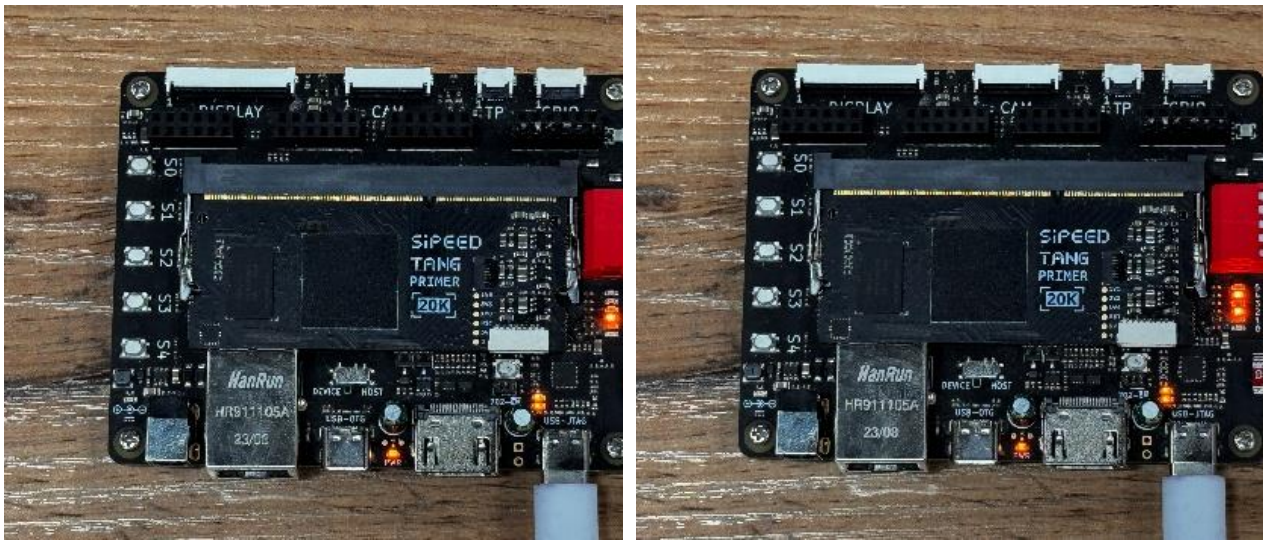
      Binary =   1111 1111 1101 1111 1111 0000 0110 1111

Hexadecimal =   0xffdff06f
```

Figure 9. Representation of the unconditional jump instruction used to organize cyclic program execution

This test verified execution-flow stability, correct execution of sequential arithmetic operations, and the absence of dropped cycles.

At a clock frequency of 27 MHz, changes in the least significant bits of the a0 register occurred too quickly to be observed visually. Therefore, the most significant bits of the a0 register (bits 24-26) were displayed on the LED indicator. A uniform change in the LED pattern (Figure 10) indicates stable execution of the cyclic program and correct write-back of computation results.



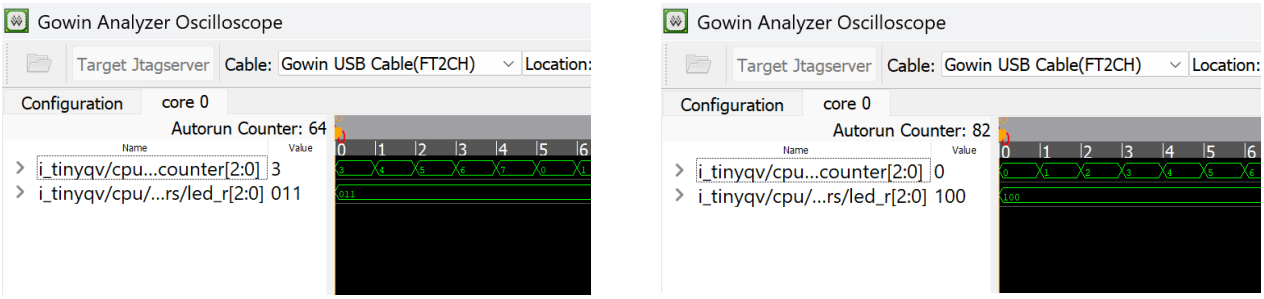
a) LED indication state, where a0 = 100

b) LED indication state after the register is incremented, resulting in a0 = 101

Figure 10. LED indication of the counter state in register a0 during hardware verification of the TinyQV processing core

The built-in GOWIN Analyzer Oscilloscope logic analyzer was used to confirm that the hardware behavior matched the expected logic. The timing diagrams for the internal led_r (a0) register, shown in Figure 11, demonstrate a consistent increase in value without gaps or deviations,

confirming correct implementation of the increment mechanism at the hardware level.



a) state before the increment (011) b) state after the increment (100)

Figure 11. Timing diagrams of changes in the led_r (a0) register state during execution of the increment instruction

HAL of the Demonstration Processing Module

In the demonstration processing module, hardware-abstraction functions are provided through the native TinyQV toolchain and are not separated into a standalone HAL software layer. The native RISC-V GNU toolchain and accompanying SDK take into account the architectural features of the processing core and its fixed memory map, ensuring correct compilation and execution of software on the MPW prototype.

Preparing the Demonstration Processing Module for MPW Prototyping

When preparing the demonstration processing module for prototyping in the TinyTapeout MPW pipeline, MPW platform constraints were taken into account, including the limited footprint of the 3-by-2 tile configuration, a fixed number of I/O lines (8 input lines, 8 output lines, and 8 general-purpose bidirectional lines), and the maximum operating frequency of 64 MHz.

The RTL description of the processing core was adapted to the requirements of the TinyTapeout platform template [40]. Functional verification was performed using a cocotb-based test environment [41].

Physical implementation of the design was performed using the automated OpenLane flow, including logic synthesis, standard-cell placement, routing, and GDSII file generation. Successful completion of DRC and LVS checks was confirmed, and timing closure against the specified constraints was achieved. After completion of the automated OpenLane flow, the demonstration processing-unit design was submitted to the TinyTapeout MPW shuttle for prototype fabrication.

Application of the Formalized Development Flow at the Cryptographic-Controller Level

The proposed development flow and MPW-prototyping approach were applied not only to the demonstration processing module but also to other functional modules of the cryptographic controller, including specialized cryptographic modules that implement digital signature algorithms within a single architectural model.

After development and hardware verification of the individual modules were completed, the modules were integrated step by step into the cryptographic controller, the final system memory map was generated, and development of the hardware abstraction layer (HAL) was completed.

Next, system-level hardware verification of the integrated FPGA architecture was performed, including verification of inter-module communication, operation of the memory subsystem and peripheral interfaces, and execution of test firmware.

Based on the FPGA verification results, the cryptographic-controller architecture was adapted to the MPW platform requirements and prepared for submission to an MPW shuttle for prototype integrated-circuit fabrication.

The following discussion evaluates these results in terms of reproducibility, verification coverage, and readiness for MPW-based physical prototyping.

The results obtained in this study confirm the practical feasibility of the proposed formalized development flow for a specialized cryptographic controller, in which architectural design, RTL implementation, FPGA-based hardware verification, an automated RTL-to-GDS flow, and subsequent submission of the design for MPW fabrication are combined into a single reproducible process. Unlike publications focused on microarchitectural optimization of individual cryptographic accelerators [10-17], studies examining particular aspects of SoC verification [18-24], or works on open-source RTL-to-GDS design [25-27, 39-41], this study demonstrates the integration of these stages into an end-to-end methodology for developing a specialized integrated circuit. The key result is that the modular architecture of the cryptographic controller enables early design verification before both system integration and physical implementation. At the modular level, RTL implementation and FPGA verification of individual functional blocks were performed. Critical modules, including the TinyQV processing core and specialized cryptographic blocks, were subjected to physical-design validation using an automated RTL-to-GDS flow, followed by tape-out preparation for MPW fabrication. At the system level, FPGA verification of the unified architecture was conducted, including verification of inter-module communication, operation of the memory subsystem and peripheral components, and execution of test firmware. The integrated architecture was prepared for physical implementation within the MPW platform. This development framework enables architectural and interface inconsistencies to be identified before the tape-out stage and reduces the risk of discovering critical errors at later design stages.

Experimental verification of the methodology on the TinyQV demonstration processing unit confirms the applicability of the proposed approach to a functionally significant cryptographic-controller core. FPGA verification on the GOWIN Tang Primer 20K platform demonstrated correct instruction fetching and execution, correct operation of the write-back mechanism, and correct operation of the memory subsystem at a clock frequency of 27 MHz. Instrumental testing using the GOWIN Analyzer Oscilloscope showed stable execution of the test program without dropped cycles or observable timing anomalies, confirming the consistency of the microarchitectural solutions and the correct transition from RTL description to hardware implementation.

An important result is the confirmation that the demonstration module can be transferred to the physical implementation level under MPW-prototyping conditions. The project was adapted to the limitations of the TinyTapeout platform, including area, I/O line count, and frequency constraints, and the automated RTL-to-GDS flow in the OpenLane environment was successfully completed. The design passed DRC and LVS checks and met the specified timing constraints. These results demonstrate the reproducibility of the physical-design stage of the methodology within an open-source toolchain and the feasibility of preparing the design for MPW fabrication without commercial EDA tools.

In addition to the demonstration computing module, the same flow was also applied to specialized cryptographic blocks. Preliminary FPGA resource estimates for hardware accelerators implementing electronic digital signature algorithms under ST RK GOST R 34.10-2015 are approximately 14 602 LUTs, 6 702 FFs, and an operating frequency of up to 23.9 MHz. These results confirm that such modules can be implemented within the proposed development flow.

This study primarily focuses on formalizing the development flow and experimentally validating it. The quantitative estimates obtained demonstrate the potential of this approach and provide a basis for further optimization of cryptographic modules in terms of performance, area, and power consumption.

Overall, the results confirm that the proposed approach provides a reproducible and technologically sound transition from an architectural model to hardware verification and physical implementation for MPW prototyping. It can therefore serve as a practical basis for creating specialized cryptographic controllers and other classes of secure SoC solutions.

Conclusion

This paper presents and experimentally verifies a formalized development flow for a specialized cryptographic controller intended for the hardware implementation of electronic digital signature algorithms. The proposed flow is implemented as a methodology based on modular development and step-by-step hardware verification of individual functional blocks, followed by physical-design verification using the MPW approach and by integration testing and physical prototyping of the system as a whole. This study established a modular architecture for a specialized cryptographic controller, including a computing core, system bus, memory subsystem, peripheral interfaces, and specialized cryptographic hardware blocks. A formalized development flow for the cryptographic controller was also formulated. This flow integrates architectural design, RTL implementation, FPGA-based hardware verification, and physical implementation in an automated RTL-to-GDS workflow. As part of the experimental verification, a demonstration computing module based on the TinyQV processor core was implemented, and a complete development cycle was carried out for this module, from RTL description to preparation for MPW prototyping.

Hardware verification of the demonstration module was conducted on the GOWIN Tang Primer 20K FPGA platform. FPGA verification confirmed correct instruction execution, operation of the memory subsystem, and operation of the write-back mechanism. Physical-design verification was performed using the automated RTL-to-GDS flow in the open-source OpenLane toolchain. Successful completion of DRC and LVS checks was confirmed, and timing closure against the specified design constraints was achieved. The results demonstrate the applicability of the proposed development flow to the integrated cryptographic-controller architecture.

The measured FPGA implementation metrics (2 460 LUTs, 964 FFs, and an operating frequency of up to 27 MHz) confirm the applicability of this approach with constrained hardware resources and its suitability for prototyping specialized cryptographic devices.тFuture research will include a more detailed evaluation of the developed cryptographic modules in terms of performance, area, and power consumption. Another important research direction is the analysis of the resilience of the hardware implementation to side-channel attacks.

Acknowledgment

This research was funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (grant no. AP26103891, "Development of a domestic cryptographic controller and its implementation in a key-storage device").

The contribution of the authors

I. Seniushin: conceptualization of the study, development of the cryptographic controller

architecture and the main stages of the development flow, participation in planning the experimental verification, analysis of the results, and critical revision of the manuscript.

N. Glazyrina: development and formalization of the research methodology, analysis of the scientific literature, analysis and interpretation of the results, preparation of the original draft, scientific editing, and revision of the manuscript.

R. Ibrayev: formulation of requirements for the cryptographic modules, participation in the development and analysis of hardware implementations of electronic digital signature algorithms, analysis of FPGA verification results, and critical revision of the manuscript.

Y. Atanbayev: participation in the development of the architecture and experimental verification strategy, analysis of the TinyQV FPGA verification results and the RTL-to-GDS/MPW prototyping stages, generalization of the experimental results, and critical revision of the manuscript.

All authors discussed the research results, approved the final version of the manuscript for publication, and agreed to be accountable for the accuracy and integrity of the work.

References

1. H. Meng, Z. Sang. “Research and Development of Digital Signatures.” *Journal of Computing and Electronic Information Management*, 16(3), 2025, DOI: https://doi.org/10.54097/2g9b0j24, pp. 23–28, Panama.
2. K. Gashi, B. Hyseni. “Digital Signatures in the Modern Era: A Review of Cryptographic Progress and Post-Quantum Challenges.” *International Journal of Innovative Technology and Interdisciplinary Sciences*, 8(4), 2025, DOI: https://doi.org/10.15157/ijitis.2025.8.4.1082-1112, pp. 1082–1112, Estonia.
3. W. Lin. “Digital Signature.” In: V. Mulder, A. Mermoud, V. Lenders, B. Tellenbach (eds.), *Trends in Data Protection and Encryption Technologies*, Springer, Cham, Switzerland, 2023, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-33386-6_15, pp. 77–81.
4. K. Somsuk. “The development of signing and verification methods for high-speed digital signatures on electronic official documents by using RSA cryptography.” *Cogent Engineering*, 11(1), 2024, DOI: https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2432513, article no. 2432513, United Kingdom.
5. T.-T. Nguyen, D.-D. Nguyen, T.-T. Dao, N.-Q. Luc. “Implementation Efficiency of Falcon Digital Signature Scheme on Arty-7 XC7A35T Board.” *Electronics*, 14(22), 2025, DOI: https://doi.org/10.3390/electronics14224504, article no. 4504, Switzerland.
6. R. Focardi, F. L. Luccio. “*A Formally Verified Configuration for Hardware Security Modules in the Cloud*.” In: CCS ’21: 2021 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security, Virtual Event, Republic of Korea, November 15–19, 2021, DOI: https://doi.org/10.1145/3460120.3484785, pp. 412–428.
7. B. Kieu-Do-Nguyen, K.-D. Nguyen, T.-K. Dang, N. The Binh, C. Pham-Quoc, N.-T. Tran, C.-K. Pham, T.-T. Hoang. “A Trusted Execution Environment RISC-V System-on-Chip Compatible with Transport Layer Security 1.3.” *Electronics,* 13(13), 2024, DOI: https://doi.org/10.3390/electronics13132508, article no. 2508, Switzerland.

A. Barenghi, D. Carrera, S. Mella, A. Pace, G. Pelosi, R. Susella. “Profiled side-channel attacks against the RSA cryptosystem using neural networks.” *Journal of Information Security and*

Applications, 66, 2022, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jisa.2022.103122, article no. 103122, Netherlands.

8. S. Jin, S. M. Cho, H. Kim, S. Hong. "Enhanced Side-Channel Analysis on ECDSA Employing Fixed-Base Comb Method." *IEEE Transactions on Computers*, 71(9), 2022, DOI: https://doi.org/10.1109/TC.2022.3191736, pp. 2341–2350, United States.
9. V. R. Kolagatla, A. Raveendran, V. Desalphine. *"A Novel and Efficient SPI-enabled RSA Crypto Accelerator for Real-Time Applications."* In: 2024 28th International Symposium on VLSI Design and Test (VDAT), Vellore, India, September 1–3, 2024, DOI: https://doi.org/10.1109/VDAT63601.2024.10705738, pp. 1–6.
10. G. Leelavathi, K. Shaila, K. R. Venugopal. "Hardware performance analysis of RSA cryptosystems on FPGA for wireless sensor nodes." *International Journal of Intelligent Networks*, 2, 2021, DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijin.2021.09.008, pp. 184–194, China.
11. R. Ghayoula, S. Bahroun, W. Amara, J. Fattahi, A. Smida, I. E. Gmati, W. Mohamed. "Optimized RSA-1024 FPGA Implementation on Artix-7." In: J. Blackledge, A.F.M. Shahen Shah, eds., *Coding Theory - Advances and Applications in Informatics, Data Analysis, and Cryptography*, IntechOpen: London, United Kingdom, 2025, DOI: https://doi.org/10.5772/intechopen.1011874
12. R. Agrawal, J. Yang, H. Javaid. "*Efficient FPGA-based ECDSA Verification Engine for Permissioned Blockchains*." In: 2022 IEEE 33rd International Conference on Application-Specific Systems, Architectures and Processors (ASAP), Gothenburg, Sweden, July 12–14, 2022, DOI: https://doi.org/10.1109/ASAP54787.2022.00032, pp. 148–155.
13. M. Bisheh-Niasar, R. Azarderakhsh, M. Mozaffari-Kermani. "Cryptographic Accelerators for Digital Signature Based on Ed25519." *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 29(7), 2021, DOI: https://doi.org/10.1109/TVLSI.2021.3077885, pp. 1297–1305, United States.
14. M. Kashif, I. Cicek, M. Imran. "*A Hardware Efficient Elliptic Curve Accelerator for FPGA-Based Cryptographic Applications*." In: 2019 11th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, November 28–30, 2019, DOI: https://doi.org/10.23919/ELECO47770.2019.8990437, pp. 362–366.
15. Родионов А. Ю. "Архитектура криптографического сопроцессора на ПЛИС". *Вопросы защиты информации: научно-практический журнал*, 3(114), 2016, С. 16–19.

I. A. Kashirin, D. R. Usmanov, I. L. Reva, K. V. Zaharov. "*Development of optical transceivers SFF standard with support for cryptographic kernel.*" In: 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, October 3–6, 2016, DOI: https://doi.org/10.1109/APEIE.2016.7806437, pp. 159–162.

J. A. Campbell, L. He, L. Yang, S. T. Gurumani, K. Rupnow, D. Chen. "*Debugging and verifying SoC designs through effective cross-layer hardware-software co-simulation.*" In: DAC '16: The 53rd Annual Design Automation Conference, Austin, Texas, USA, June 5–9, 2016, DOI: https://doi.org/10.1145/2897937.2898002, pp. 1–6.

K. Chen, L. Sun, Q. Deng. "Hardware and software co-verification from a security perspective in SoC platforms." *Journal of Systems Architecture*, 122, 2022, DOI: https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102355, article no. 102355, Netherlands.

16. P. Pamula, D. P. Gorthy, P. S. Ngangbam, A. Alagarsamy. "*Verification of SoC Using Advanced Verification Methodology.*" In: International Conference on "Holography Meets Advanced

Manufacturing", Online, February 20–22, 2023, DOI: https://doi.org/10.3390/HMAM2-14160, article no. 12.

A. Hegazy, S. El-Ashry, M. W. El-Kharashi, M. Taher. "*Verification of an ARM Cortex-M3-based SoC using UVM.*" In: 2023 10th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN 2023), Noida, India, March 23–24, 2023, DOI: https://doi.org/10.1109/SPIN57001.2023.10116300, pp. 778–783.

17. U. Farooq, H. Mehrez. "Pre-Silicon Verification Using Multi-FPGA Platforms: A Review." *Journal of Electronic Testing*, 37(1), 2021, DOI: https://doi.org/10.1007/s10836-021-05929-1, pp. 7–24, United States.
18. E. Perdomo, A. Kropotov, F. K. Cano Ladino, S. Zafar, T. Cervero, X. M. Bofill, B. Salami. "*Makinote: An FPGA-Based HW/SW Platform for Pre-Silicon Emulation of RISC-V Designs.*" In: RAPIDO '24: Proceedings of the 16th Workshop on Rapid Simulation and Performance Evaluation for Design, Munich, Germany, January 18, 2024, DOI: https://doi.org/10.1145/3642921.3642928, pp. 29–34.
19. S. Stoyanov, N. Kakanakov, M. Marinova. "*FPGA Prototyping of Heterogeneous Security Architecture for Educational Purposes.*" In: The 14th International Scientific Conference TechSys 2025 – Engineering, Technology and Systems, Plovdiv, Bulgaria, May 15–17, 2025, DOI: https://doi.org/10.3390/engproc2025100018, article no. 18.
20. P. Fath, M. Moser, G. Zachl, H. Pretl. "Open-source design of integrated circuits." *e+i Elektrotechnik und Informationstechnik*, 141, 2024, DOI: https://doi.org/10.1007/s00502-023-01195-5, pp. 76–87, Austria.
21. Chew, Ch.-Y. Ooi, Ch. N. Chye. "Integrating Design for Testability Technique into OpenLane with Skywater 130-Nanometer Process Design Kit." *Semarak Engineering Journal*, 3(1), 2023, DOI: https://doi.org/10.37934/sej.3.1.1421b, pp. 14–21, Malaysia.
22. D. Franck, G. A. Ginja, J. P. Carmo, J. A. Afonso, M. Luppe. "Custom ASIC Design for SHA-256 Using Open-Source Tools." *Computers*, 13(1), 2024, DOI: https://doi.org/10.3390/computers13010009, article no. 9, Switzerland.
23. H. Witharana, Y. Lyu, S. Charles, P. Mishra. "A Survey on Assertion-based Hardware Verification." *ACM Computing Surveys*, 54(11s), 2022, DOI: https://doi.org/10.1145/3510578, pp. 1–33, United States.
24. S. Canakci, L. Delshadtehrani, F. Eris, M. B. Taylor, M. Egele, A. Joshi. "*DirectFuzz: Automated Test Generation for RTL Designs using Directed Graybox Fuzzing.*" In: 58th ACM/IEEE Design Automation Conference (DAC 2021), San Francisco, California, USA, December 5–9, 2021, DOI: https://doi.org/10.1109/DAC18074.2021.9586289, pp. 529–534.
25. M. Hossain, A. Vafaei, K. Z. Azar, F. Rahman, F. Farahmandi, M. Tehranipoor. "*SoCFuzzer: SoC Vulnerability Detection using Cost Function enabled Fuzz Testing*." In: 2023 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), Antwerp, Belgium, April 17–19, 2023, DOI: https://doi.org/10.23919/DATE56975.2023.10137024, pp. 1–6.
26. J. Hur, S. Song, D. Kwon, E. Baek, J. Kim, B. Lee. "*DifuzzRTL: Differential Fuzz Testing to Find CPU Bugs.*" In: 2021 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP), Virtual, San Francisco, California, USA, May 24–27, 2021, DOI: https://doi.org/10.1109/SP40001.2021.00103, pp. 1286–1303.
27. H. Al-Shaikh, A. Vafaei, M. M. Rahman, K. Z. Azar, F. Rahman, F. Farahmandi, M. Tehranipoor. "*SHarPen: SoC Security Verification by Hardware Penetration Test*." In: ASPDAC '23: 28th Asia

and South Pacific Design Automation Conference, Tokyo, Japan, January 16–19, 2023, DOI: https://doi.org/10.1145/3566097.3567918, pp. 579–584.
28. Wagner, K. Heid, J. Heider. "*Remote WebAuthn: FIDO2 Authentication for Less Accessible Devices.*" In: 7th International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP 2021), Virtual Event, February 11–13, 2021, DOI: https://doi.org/10.5220/0010192703680375, pp. 368–375.
29. M. Rivera-Dourado, M. Gestal, A. Pazos, J. A. Vázquez-Naya. "A Novel Protocol Using Captive Portals for FIDO2 Network Authentication." *Applied Sciences*, 14(9), 2024, DOI: https://doi.org/10.3390/app14093610, article no. 3610, Switzerland.
30. *GlobalShuttle™ multi-project wafer program*. Available online: https://gf.com/manufacturing-services/multi-project-wafer-program/ (accessed on 27 May 2026).
31. *Offered MPW Services – Si CMOS, Compound Semiconductor.* Available online: https://www.mosis2.com/mpw-services (accessed on 27 May 2026).
32. *TSMC MPW Shared Tapeouts.* Available online: https://www.musesemi.com/shared-block-tapeout-pricing (accessed on 27 May 2026).
33. *Cadence and SkyWater: Fostering the Next Generation of Innovators.* Available online: https://community.cadence.com/cadence_blogs_8/b/can/posts/cadence-and-skywater-fostering-the-next-generation-of-innovators (accessed on 27 May 2026).
34. *Tiny Tapeout.* Available online: https://tinytapeout.com/chips/ (accessed on 27 May 2026).
35. M. Venn. "Tiny Tapeout: A shared silicon tape out platform accessible to everyone." *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 16(2), 2024, DOI: https://doi.org/10.1109/MSSC.2024.3381097, pp. 20–29, United States.
36. *Cocotb*. Available online: https://www.cocotb.org/ (accessed on 27 May 2026).

Information about the authors:

Igor Seniushin – TSARKA R&D LLP, 51/1 Kabanbai Batyr Avenue, 010000, Astana, Republic of Kazakhstan, project manager
Natalya Glazyrina – corresponding author, TSARKA R&D LLP, 51/1 Kabanbai Batyr Avenue, 010000, Astana, Republic of Kazakhstan, research project coordinator, PhD, associate professor,
Renat Ibrayev – TSARKA R&D LLP, 51/1 Kabanbai Batyr Avenue, 010000, Astana, Republic of Kazakhstan, cryptographic security specialist
Yernat Atanbayev – TSARKA R&D LLP, 51/1 Kabanbai Batyr Avenue, 010000, Astana, Republic of Kazakhstan, head of the Scientific Department

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Editor-in-Chief: B.B. Togizbayeva
Desktop Publishing and Layout: A. Tulekov

Instructions for Authors and the Publication Ethics Statement are available on the journal website: http:// ejaet.enu.kz

Eurasian Journal of Applied Engineering and Technology (EJAET)
No. 3 (156), 2026 – Astana: L.N. Gumilyov Eurasian National University. – 270 pp.

Volume: 15.8 printer's sheets.
Print run: On demand.

Signed for publication: September 30, 2026.

Open Access Electronic Version: http:// ejaet.enu.kz

The Publisher is not responsible for the content of the published materials.

Editorial Office:
L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Kazhimukhan str 13, of. 424, Z01C0X1

Printed by the Publishing House of L.N. Gumilyov Eurasian National University.