

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ ҒЫЛЫМ
ЖӘНЕ ЖОҒАРЫ БІЛІМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ҚАЗАҚСТАН ӨНДІРІС КӨЛІГІ

**ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ
КАЗАХСТАНА**

**INDUSTRIAL TRANSPORT
OF KAZAKHSTAN**

ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)

**ХАЛЫҚАРАЛЫҚ
КӨЛІКТІК-
ГУМАНИТАРЛЫҚ
УНИВЕРСИТЕТІ**



**МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ТРАНСПОРТНО-
ГУМАНИТАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

2025 №2(86)

апрель-июнь

РЕДАКЦИЯЛЫҚ КЕҢЕС:

БАС РЕДАКТОР:

Омаров Амангельды Джумагалиевич — (Халықаралық көліктік-гуманитарлық университетінің Президенті, т.ғ.д., проф., халықаралық көлік және ақпараттандыру академияларының толық мүшесі)

РЕДАКЦИЯЛЫҚ АЛҚА:

Турдалиев Ауезхан Турдалиевич — (т.ғ.д., проф., Машина жасау, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:56466038000, Scopus h-индекс - 2)

Майлыбаев Ерсайын Курманбаевич — (PhD, Автоматтандыру және басқару, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:57190165227, Scopus h-индекс - 2)

Ахметов Бахытжан Сражатдинович — (т.ғ.д., проф., Әлеуметтік экономикалық жүйелерде басқару, Абай ат. Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:56910050000, Scopus h-индекс - 8)

Ахметов Данияр Ақбулатович — (т.ғ.д., проф., Құрылыс бұйымдары мен конструкцияларын өндіру, Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:57224279309, Scopus h-индекс - 5)

Войцик Вальдемар — (т.ғ.д., проф., Люблин политехникалық университеті, Польша, Scopus Autor ID:7005121594, Scopus h-индекс - 25)

Лахно Валерий Анатольевич — (т.ғ.д., проф., Ақпаратты қорғау жүйесі, Ұлттық биоресурстар және табиғатты пайдалану университеті, Украина, Scopus Autor ID:57680586200, Scopus h-индекс - 13)

Оралбекова Аяулым Оралбековна — (PhD, Ақпараттандыру және басқару, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Қазақстан, Алматы Scopus Autor ID:57210248989, Scopus h-индекс - 3)

Жұман Жаппар — (э.ғ.д., проф., Экономика, әл-Фараби ат. ҚазҰУ, Қазақстан, Алматы Scopus Autor ID:56658765400, Scopus h-индекс - 7)

Козбакова Айнур Холдасовна — (PhD, Ақпараттық жүйе, әл-Фараби ат. Қазақ Ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы, Scopus Autor ID:57195683902, Scopus h-индекс - 8)

Фуад Мохамед Хасан Хошнав — (PhD, Машина жасау, Де Монтфорт университеті, Ұлыбритания, Лестер, Scopus Autor ID:14008036500, Scopus h-индекс - 8)

Миркин Евгений Леонидович — (т.ғ.д., проф., Ақпаратты өңдеу және басқару, Қырғызстан халықаралық университеті, Қырғызстан, Бішкек, Scopus Autor ID:15623452500, Scopus h-индекс - 5)

«Қазақстан өндіріс көлігі» журналы

ISSN: 1814-5787 (print)

ISSN: 3006-0273 (online)

Меншік иесі: Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті (Алматы қ.).

Қазақстан Республикасы Ақпарат және қоғамдық даму министрлігінде тіркелген. Тіркеу туралы куәлік № KZ27VPY00074524, 28.07.2023 ж. берілген.

Тақырып бағыты: Есептеу техникасы, ақпараттық жүйелер, электр энергетикасы және көлікті автоматтандыру.

Мерзімділігі: жылына 4 рет.

Тираж: 500 дана.

Редакция мекенжайы: Қазақстан, Алматы қ., Жетісу-1 ықшам ауданы, 32а үй.

Кон. Тел.: 8 (727) 376-74-78.

E-mail: info@mtgu.edu.kz

Журнал сайты: <https://prom.mtgu.edu.kz>

© Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, 2025

© Авторлар ұжымы, 2025

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Омаров Амангельды Джумагалиевич — (Президент Международного транспортно-гуманитарного университета, д.т.н. профессор, действительный член международных академий транспорта и информатизации)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Турдалиев Ауезхан Турдалиевич — (д.т.н., проф., Машиностроение, Международный транспортно-гуманитарный университет, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:56466038000, Scopus h-индекс - 2)

Майлыбаев Ерсайын Курманбаевич — (PhD, Автоматизация и управление, Международный транспортно-гуманитарный университет, Казахстан, Алматы Scopus Autor ID:57190165227, Scopus h-индекс - 2)

Ахметов Бахытжан Сражатдинович — (д.т.н., проф., управление в социальных и экономических системах, Казахский национальный педагогический университет имени Абая, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:56910050000, Scopus h-индекс - 8)

Ахметов Данияр Акбулатович — (д.т.н., проф., производство строительных изделий и конструкций, Казахский национальный исследовательский технический университет, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:57224279309, Scopus h-индекс - 5)

Войцик Вальдемар — (д.т.н., профессор Люблинского политехнического университета, Польша, Scopus Autor ID:7005121594, Scopus h-индекс - 25)

Лахно Валерий Анатольевич — (д.т.н., проф., системы защиты информации, Национальный университет биоресурсов и природопользования, Украина, Scopus Autor ID:57680586200, Scopus h-индекс - 13)

Оралбекова Аяулым Оралбековна — (PhD, Автоматизация и управление, Международный транспортно-гуманитарный университет, Казахстан, Алматы Scopus Autor ID:57210248989, Scopus h-индекс - 3)

Жуман Жаппар — (д.э.н., проф., КазНУ им. аль-Фараби, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:56658765400, Scopus h-индекс - 7)

Козбакова Айнур Холдасовна — (PhD, Информационные системы, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, Алматы, Scopus Autor ID:57195683902, Scopus h-индекс - 8)

Фуад Мохамед Хасан Хошнав — (PhD, машиностроение, Университет Де Монтфорт, Великобритания, Лестер, Scopus Autor ID:14008036500, Scopus h-индекс - 8)

Миркин Евгений Леонидович — (д.т.н., проф., управление и обработка информации, Международный университет Кыргызстана, Кыргызстан, Бишкек, Scopus Autor ID:15623452500, Scopus h-индекс - 5)

Журнал «Промышленный транспорт Казахстана»

ISSN: 1814-5787 (print)

ISSN: 3006-0273 (online)

Собственник: Международный транспортно-гуманитарный университет (г. Алматы).

Свидетельство о постановке на учет периодического печатного издания в Министерство информации и общественного развития Республики Казахстан № KZ27VPY00074524, выданное от 28.07.2023 г.

Тематическая направленность: вычислительная техника, информационные системы, электроэнергетика и автоматизация транспорта.

Периодичность: 4 раза в год.

Тираж: 500 экземпляров.

Адрес редакции: г. Алматы, мкрн. Жетысу-1, д. 32а. Кон. Тел.: 8(727) 376-74-78

E-mail: info@mtgu.edu.kz

Сайт журнала: <https://prom.mtgu.edu.kz>

EDITOR-IN-CHIEF:

Omarov Amangeldy Dzhumagalievich — (President of the International Transport and Humanities University, Doctor of Technical Sciences, Professor, full member of the international academies of transport and information)

EDITORIAL BOARD:

Turdaliev Auyezkhan Turdalievich — (Doctor of Technical Sciences, Professor, Mechanical Engineering, International Transport and Humanitarian University, Kazakhstan, Almaty, Scopus Autor ID:56466038000, Scopus h-index - 2)

Mailybaev Ersayyn Kurmanbaevich — (PhD, Automation and Management, International Transport and Humanitarian University, Kazakhstan, Almaty Scopus Autor ID:57190165227, Scopus h-index - 2)

Akhmetov Bakhytzhhan Batdinovich — (Doctor of Technical Sciences, Professor, Management in social and economic systems, Abai Kazakh National Pedagogical University, Kazakhstan, Almaty, Scopus Autor ID:56910050000, Scopus h-index - 8)

Akhmetov Daniyar Akbulatovich — (Doctor of Technical Sciences, Professor, manufacture of building products and structures, Kazakh National Research Technical University, Kazakhstan, Almaty, Scopus Autor ID:57224279309, Scopus h-index - 5)

Wojcik Waldemar — (Doctor of Technical Sciences, Professor at Lublin Polytechnic University, Poland, Scopus Autor ID:7005121594, Scopus h-index - 25)

Valery A. Lakhno — (Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Security Systems, National University of Bioresources and Environmental Management, Ukraine, Scopus Autor ID:57680586200, Scopus h-index - 13)

Oralbekova Ayaulym Oralbekovna — (PhD, Automation and Management, International Transport and Humanitarian University, Kazakhstan, Almaty Scopus Autor ID:57210248989, Scopus h-index - 3)

Zhuman Zhappar — (Doctor of Economics, Prof., KazNU named after. al-Farabi, Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, Almaty Scopus Autor ID:56658765400, Scopus h-index - 7)

Kozbakova Ainur Holdasovna — (PhD, Information Systems, Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty, Scopus Autor ID:57195683902, Scopus h-index - 8)

Fouad Mohamed Hassan Khoshnav — (PhD, Mechanical Engineering, De Montfort University, UK, Leicester, Scopus Autor ID:14008036500, Scopus h-index - 8)

Mirkin Evgeny Leonidovich — (Doctor of Technical Sciences, Professor, Information Management and Processing, International University of Kyrgyzstan, Kyrgyzstan, Bishkek, Scopus Autor ID:15623452500, Scopus h-index - 5)

Industrial Transport of Kazakhstan

ISSN: 1814-5787 (print)

ISSN: 3006-0273 (online)

Owner: International university of transportation and humanities (Almaty).

The certificate of registration of a periodical printed publication in the Ministry of Information and Social Development of the Republic of Kazakhstan, Information Committee KZ27VPY00074524, issued July 28, 2023.

Thematic focus: computer engineering, information systems, electrical power engineering, and transport automation.

Periodicity: 4 times a year.

Circulation: 500 copies.

Editorial address: Kazakhstan, Almaty, microdistrict Zhetysu-1, building 32a. Tel.: 8 (727) 376-74-78

E-mail: info@mtgu.edu.kz

Journal website: <https://prom.mtgu.edu.kz>

МАЗМҰНЫ

ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖӘНЕ КӨЛІКТІ АВТОМАТТАНДЫРУ

Д. Амрина	
МОБИЛЬДІ ҚОСЫМШАЛАР ПАЙДАЛАНУШЫЛАРЫНЫҢ ҚАЛАУЛАРЫН МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ ТАЛДАУ	7
И. Асильбекова, Г. Муратбекова, З. Қонақбай	
ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ӘУЕЖАЙЛАРЫНЫҢ ИНФРАҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ АҒЫМДАҒЫ ЖАЙ-КҮЙІ	20
Ж. Батырканов	
ОРТАЛЫҚТАНДЫРЫЛМАҒАН ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ АВТОМАТТАНДЫРУДЫҢ ӨНДІРІСТІК ЦИКЛІН ЗЕРТТЕУ	31
В.П. Перевертов, Г. Афанасьев, М.М. Абулкасимов, М.О. Акаева	
ҚАТТЫ МАТЕРИАЛДАРДЫ САҚТАУҒА АРНАЛҒАН БУНКЕРДЕГІ ЖЫЛЖЫМАЛЫ ҚҰЛАТҚЫШТЫҢ ЖҰМЫС САПАСЫН АРТТЫРУ	44

ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР

Г. Еркелдесова	
ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖӘНЕ ҚАЗАҚСТАННЫҢ КӨЛК- ЛОГИСТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕСІН МОДЕЛЬДЕУ	57
Е. Майлыбаев	
ТЕМІРЖОЛ СТАНЦИЯСЫНЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСІН БАЛАМАЛЫҚ МОДЕЛЬ НЕГІЗІНДЕ МОДЕЛЬДЕУГЕ АРНАЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ЖАСАҚТАМАЛАРҒА ШОЛУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ	65
Ө. Үмбетов, Г. Морокина, Ц. Хувен	
ОРТАЛЫҚТАНДЫРЫЛМАҒАН БАСҚАРУМЕН БАСҚАРУДЫҢ ИКЕМДІ ЖҮЙЕЛЕРІН АВТОМАТТАНДЫРУДЫ ЖОБАЛАУ	76
М. Шалабаева	
ТЕМІРЖОЛ КӨЛІГІНДЕГІ ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙЛАРҒА ДЕН ҚОЮДЫ КОМПЬЮТЕРЛІК ҚОЛДАУ	90

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА

Д. Амрина	
АНАЛИЗ ПРЕДПОЧТЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ	7
И. Асильбекова, Г. Муратбекова, З. Қонақбай	
ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОПОРТОВ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН	20
Ж. Батырканов	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ	31
В.П. Перевертов, М.М. Абулкасимов, Г.И. Афафнасьев, М.О. Акаева³	
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО СВОДООБРУШИТЕЛЯ В БУНКЕРЕ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ТРУДНОСЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	44



ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Г. Еркелдесова	
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КАЗАХСТАНА	57
Е. Майлыбаев	
ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ НА БАЗЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ	65
О. Үмбетов, Г. Морокина, Ц. Хуven	
АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ	76
М. Шалабаева	
КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА РЕАГИРОВАНИЯ НА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ	90

CONTENTS

ELECTRICAL POWER ENGINEERING AND TRANSPORT AUTOMATION

D. Amrina	
ANALYSIS OF MOBILE APPLICATION USER PREFERENCES BASED ON MACHINE LEARNING METHODS	7
I. Asilbekova, G. Muratbekova, Z. Konakbai	
THE CURRENT STATE OF THE INFRASTRUCTURE OF THE AIRPORTS OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN	20
Zh. Batyrkanov	
RESEARCH OF THE PRODUCTION CYCLE OF AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN DECENTRALIZED SYSTEMS	31
V. Perevertov, G. Afanasev, M. Abulkasimov, M. Akayeva	
IMPROVING THE QUALITY OF OPERATION OF A MOBILE CRUSHER IN A BUNKER FOR STORING SOLID MATERIALS	44

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

G. Yerkeldessova	
INTELLIGENT TECHNOLOGIES AND MODELING OF THE TRANSPORT AND LOGISTICS SYSTEM OF KAZAKHSTAN	57
Y. Mailybayev	
REVIEW AND ANALYSIS OF SOFTWARE FOR MODELING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF A RAILWAY STATION BASED ON SIMULATION MODEL	65
O. Umbetov, G. Morokina, T. Khuven	
AUTOMATIZATION DESIGN OF FLEXIBLE SYSTEMS FOR MANAGEMENT WITH DECENTRALIZED CONTROL	76
M. Shalabayeva	
COMPUTER SUPPORT FOR RESPONDING TO RAILWAY EMERGENCIES	90

**ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖӘНЕ КӨЛІКТІ
АВТОМАТТАНДЫРУ / ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И
АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА / ELECTRICAL POWER
ENGINEERING AND TRANSPORT AUTOMATION**

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is. 2. Number 86 (2025). Pp. 7–19
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.001>

**ANALYSIS OF MOBILE APPLICATION USER PREFERENCES BASED ON
MACHINE LEARNING METHODS**

*D. Amrina**

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: amrina.dana@mtgu.edu.kz,

Dana Amrina — master student, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: amrina.dana@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-8263-1962>.

© D. Amrina

Abstract. This study examined classical machine learning methods and neural networks for analyzing user preferences in mobile applications. The target variable and preference criterion was the average app rating. A dataset from the open source Kaggle was used, followed by data cleaning and preprocessing. A comparative analysis was conducted on three classical machine learning methods (linear regression, random forest, XGBoost) and three neural network models (ANN, CNN, RNN) to predict users' average app ratings based on seven features. As the dataset was relatively small and of simple structure, some neural network models could not fully realize their potential. The XGBoost model demonstrated the best performance, highlighting its usefulness for this type of data. The CNN model performed slightly worse, as it is designed to capture significant patterns in complex datasets. The most important features for predicting user ratings were identified, including types, installations, genres, categories, and others. In future work on decision-making tasks aimed at improving user engagement, this study can assist in selecting appropriate models and input features to focus on when designing or enhancing an application.

Keywords: rating, application, machine learning, neural networks, prediction, data analysis

For citation: D. Amrina. Analysis of mobile application user preferences based on machine learning methods//Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 86. Pp. 7–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.001>

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

**МОБИЛЬДІ ҚОСЫМШАЛАР ПАЙДАЛАНУШЫЛАРЫНЫҢ ҚАЛАУЛАРЫН
МАШИНАЛЫҚ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІ НЕГІЗІНДЕ ТАЛДАУ**

Д. Амрина



Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет, Алматы, Қазақстан.
E-mail: amrina.dana@mtgu.edu.kz,

Дана Амрина — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет, Алматы, Қазақстан.
E-mail: amrina.dana@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-8263-1962>.

© Д. Амрина

Аннотация. Осы жұмыста мобильді қосымшалардың пайдаланушылардың қалауларын талдау үшін классикалық машиналық оқыту және нейрондық желілер әдістері қарастырылды. Мақсатты көрсеткіш және қалаулар критерийі ретінде қосымшаның орташа рейтингі алынған. Ашық дереккөзі Kaggle-дан алынған датасет қолданылып, деректерді тазалау және алдын ала өңдеу жүргізілді. Орташа пайдаланушы баға көрсеткішін болжау үшін 7 параметр негізінде 3 классикалық машиналық оқыту әдісі (linear regression, random forest, XGBoost) және 3 нейрондық желі моделі (ANN, CNN, RNN) салыстырмалы талдаудан өткізілді. Датасет салыстырмалы түрде шағын және қарапайым құрылымға ие болғандықтан, кейбір нейрондық желі модельдері өз потенциалын толық ашпаған. Ең жақсы нәтижені XGBoost моделі көрсетті, бұл осы деректер түрінде аталған модельдің тиімділігін дәлелдейді. CNN моделі сәл төмен нәтижелер көрсетті, себебі ол күрделі деректердегі маңызды байланыстарды анықтауға арналған. Пайдаланушы рейтингісін болжауда ең маңызды сипаттамалар анықталды: типтер, орнатулар, жанрлар, категориялар және басқа факторлар. Болашақта пайдаланушылардың қатысуын арттыру саласындағы шешім қабылдау тапсырмаларымен жұмыс істегенде, бұл жұмыс тиісті модель мен кіріс сипаттамаларын анықтауға және қосымшаны жасау немесе жетілдіру кезінде назар аударуға көмектеседі.

Түйін сөздер: рейтинг, қосымша, машиналық оқыту, нейрондық желілер, болжау, деректерді талдау

Дәйексөздер үшін: Д. Амрина. Мобильді қосымшалар пайдаланушыларының қалауларын машиналық оқыту әдістері негізінде талдау // Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 86. 7–19 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.001>.

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

АНАЛИЗ ПРЕДПОЧТЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Д. Амрина

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: amrina.dana@mtgu.edu.kz,

Д. Амрина — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан
E-mail: amrina.dana@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0000-8263-1962>.

© Д. Амрина

Аннотация. В данной работе были рассмотрены методы классического машинного обучения и нейронных сетей для анализа предпочтений пользователей мобильных приложений. В качестве целевого значения и критерия предпочтения был взят средний рейтинг приложения. Был использован датасет из открытого источника Kaggle, далее была проведена очистка, предобработка данных. Проведен сравнительный анализ 3 классических методов машинного обучения, среди которых linear regression, random forest,

XGBoost, а также 3 модели нейронных сетей, из которых ANN, CNN, RNN, для прогнозирования средних оценок пользователей приложения исходя из 7 признаков. Так как датасет относительно небольшой с простой структурой данных, некоторые модели нейронных сетей не смогли полностью раскрыть весь свой потенциал. Наилучшую производительность показала модель XGBoost, что показывает пользу данной модели в таком виде данных. Немного хуже показала модель CNN, так как она предназначена для выявления важных зависимостей в сложных данных. Были выявлены наиболее важные признаки, которые больше всего помогли в прогнозировании значения рейтинга пользователей, среди которых типы, установки, жанры, категории, и другие. В будущем, работая с задачей принятия решений в области улучшения вовлеченности пользователей, эта работа поможет в определении подходящей модели и входных признаков, на которые стоит обратить внимание при создании или улучшении приложения.

Ключевые слова: рейтинг, приложение, машинное обучение, нейронные сети, прогнозирование, анализ данных.

Для цитирования: Д. Амрина. Анализ предпочтения пользователей мобильных приложений на основе методов машинного обучения//Промышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. No. 86. Стр. 7–19. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.001>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Современные цифровые системы активно используют методы глубокого обучения для анализа поведения пользователей и прогнозирования их действий (Bell, 2022: 207–216). В последние годы искусственный интеллект становится ключевым инструментом для оптимизации и автоматизации процессов в различных сферах, включая цифровые платформы и мобильные приложения (Sharifani, 2023: 12). Машинное обучение (ML) является одной из областей искусственного интеллекта и позволяет создавать системы, способные самостоятельно обучаться на основе данных без необходимости явного программирования (Sarker, 2021: 160).

Нейроны, как биологическая модель, адаптируют свои связи для предсказания будущей активности и минимизации ошибок, что позволяет оптимизировать обработку информации и повышать эффективность работы системы (Luczak, 2022: 62–72). Подобные принципы используются в ML для анализа поведения пользователя, что помогает выявлять эффективные и неэффективные элементы интерфейса, повышать персонализацию и удовлетворенность пользователей (Dina, 2021: 100462; Sharifani, 2022: 5).

Объектом исследования в данной работе являются цифровые приложения, доступные в Google Play Store, а предметом — механизмы мотивации пользователей через анализ факторов, влияющих на их оценки мобильных приложений (Google Play Store Apps, 2025). Проблемная ситуация заключается в том, что, несмотря на активное применение методов ML для прогнозирования рейтингов приложений, большинство исследований не дают полного понимания взаимосвязей между характеристиками приложений и поведением пользователей (Suleman, 2019: 57).

Актуальность темы определяется как теоретическим, так и практическим интересом к изучению цифровой вовлеченности пользователей. Прогнозирование рейтингов приложений позволяет не только оценить степень удовлетворенности пользователей, но и выявить потенциальные закономерности, которые могут быть использованы для персонализации интерфейсов и улучшения цифрового опыта (Yu, 2022: 26; Taue, 2023: 91).

Целью исследования является анализ предпочтений пользователей мобильных приложений и прогнозирование их рейтинга как показателя вовлеченности. Для

достижения цели были поставлены следующие задачи:

- Провести анализ характеристик приложений, таких как категория, тип, контент-рейтинг, количество установок, цена, размер и жанр.
- Разработать модели машинного обучения и глубокого обучения для прогнозирования рейтингов приложений.
- Провести сравнительный анализ различных моделей и выявить наиболее значимые признаки, влияющие на рейтинг.
- Сделать выводы о возможностях персонализации интерфейсов и повышении вовлеченности пользователей на основе анализа данных.

Методы исследования включают использование библиотек TensorFlow и scikit-learn, реализацию нейронных сетей (ANN, CNN, RNN/LSTM), а также классических моделей машинного обучения (Random Forest, XGBoost, линейная регрессия) с оценкой качества моделей через метрики MAE, RMSE и R^2 .

Гипотеза исследования заключается в том, что с помощью моделей глубокого обучения возможно выявить зависимость между характеристиками приложений и рейтингами пользователей, а также определить ключевые факторы, влияющие на вовлеченность пользователей, несмотря на ограниченность и неравномерность данных (Somers & Black, 2025: 056036).

Значение исследования заключается в возможности использования полученных результатов для оптимизации интерфейсов мобильных приложений, разработки персонализированных цифровых решений и повышения удовлетворенности пользователей.

Материалы и методы

В качестве материалов исследования использован открытый набор данных Google Play Store Apps, размещенный на платформе Kaggle (Google Play Store Apps, 2025). Датасет содержит информацию о мобильных приложениях, включая 13 признаков: категорию приложения, тип, контент-рейтинг, количество установок, цену, размер, жанры, дату последнего обновления, версию приложения и ряд других характеристик. После очистки данных от пропусков и аномальных значений в исследование было включено 9366 примеров. Выборка отражает различные категории приложений и разнообразие пользовательских предпочтений, что обеспечивает возможность анализа факторов, влияющих на оценку и вовлеченность пользователей.

Количественная характеристика материала представлена распределением данных по 7 ключевым признакам, использованным в модели регрессии: категория, тип, контент-рейтинг, установки, цена, размер, жанры. Качественный анализ включал проверку достоверности данных, идентификацию выбросов и несоответствий в категории и жанрах, что позволило повысить надежность дальнейших моделей прогнозирования.

Цель и гипотеза исследования

Цель исследования — анализ предпочтений пользователей мобильных приложений и прогнозирование рейтинга приложений как показателя вовлеченности пользователей. Гипотеза исследования заключается в том, что использование моделей глубокого обучения позволяет выявить зависимость между характеристиками приложений и пользовательским рейтингом, а также определить ключевые признаки, влияющие на вовлеченность пользователей (Somers & Black, 2025: 056036).

Вопросы исследования:

- Какие характеристики приложений оказывают наибольшее влияние на пользовательский рейтинг?
- Насколько эффективно модели машинного и глубокого обучения прогнозируют рейтинги приложений?
- Какие методы позволяют улучшить точность предсказания в условиях неравномерного распределения данных?

- Как выявленные закономерности могут быть использованы для персонализации интерфейсов приложений и повышения удовлетворенности пользователей?

Этапы исследования:

- Подготовка данных: очистка, нормализация и кодирование категориальных признаков.

- Разделение выборки: 80% данных использованы для обучения моделей, 20% — для тестирования.

- Разработка моделей: реализованы нейронные сети (ANN, CNN, LSTM) и классические модели машинного обучения (Random Forest, XGBoost, линейная регрессия).

- Обучение и настройка моделей: оптимизация гиперпараметров, использование оптимизатора Adam и функции потерь MSE для нейронных сетей.

- Оценка качества моделей: расчет метрик MAE, RMSE и R^2 для сравнения точности предсказаний.

- Анализ важности признаков: выявление наиболее значимых характеристик приложений для прогнозирования рейтинга.

- Интерпретация результатов: выявление закономерностей, оценка влияния редких и неравномерно распределенных данных на точность моделей.

Методы машинного обучения:

- Линейная регрессия — используется для визуализации зависимостей и первичного анализа данных.

- Random Forest Regressor — баланс между качеством предсказаний и скоростью обучения, выявление важности признаков.

- XGBoost — градиентный бустинг для табличных данных, показавший наилучшую точность прогнозирования.

Методы глубокого обучения:

- ANN (Artificial Neural Network) — полносвязная нейронная сеть для выявления сложных нелинейных зависимостей.

- CNN (Convolutional Neural Network) — использование сверток для выделения локальных особенностей признаков.

- LSTM (Long Short-Term Memory, RNN) — анализ последовательностей признаков для прогнозирования рейтинга.

- Предварительная обработка данных: нормализация числовых признаков, one-hot кодирование категориальных признаков, удаление пропусков и аномалий.

- Оценка моделей: метрики RMSE (Root Mean Square Error), MAE (Mean Absolute Error) и коэффициент детерминации R^2 , позволяющие объективно оценить точность прогнозов и объясняемость моделей.

Применение данных методов позволяет выявить закономерности в оценках приложений, определить значимые признаки, влияющие на рейтинг, и предложить рекомендации для повышения вовлеченности пользователей на цифровых платформах. Новизна исследования заключается в сравнительном анализе традиционных и глубоких моделей на одном наборе данных и выявлении специфики прогнозирования рейтинга с учетом редких и неравномерно распределенных категориальных признаков.

Для анализа данных применяются методы машинного обучения с использованием библиотек TensorFlow и scikit-learn. Реализованы модели: нейронная сеть с архитектурой ANN (artificial neural network), CNN (convolutional neural network), RNN (recurrent neural network), а также для сравнения использованы модель Random Forest Regressor, XGBoost, и линейная регрессия. Для работы с данными была проведена очистка и нормализация данных. Также было произведено разделение данных на обучающую для тренировки нейронной сети и тестовую для произведения прогнозов. Качество моделей оценивалось с помощью метрик MAE, RMSE и R^2 .

Датасет использовался из Kaggle, под названием Google Play Store Apps (Google Play Store Apps, 2025). После очистки данных от пустых значений, вышло 9366 примеров с 13 признаками. Далее, датасет делился на 80% обучающиеся данные, и 20% на тестовые данные.

В данной работе у нас решается проблема регрессии, так как будет предсказываться средний рейтинг приложения, поставленный пользователями в пределах от 1 до 5, по 7 отобраным признакам (категория, тип, контент-рейтинг, установки, цена, размер, жанры), которые будут полезны для нашей задачи регрессии. Для нейронных сетей использовался оптимизатор “adam”, а критерий потери – “mse”.

Ниже приведены архитектуры 3-х разных нейронных сетей, а после них классические модели машинного обучения.

Layer (type)	Output Shape	Param #
dense (Dense)	(None, 64)	512
dense_1 (Dense)	(None, 32)	2,080
dense_2 (Dense)	(None, 16)	528
dense_3 (Dense)	(None, 1)	17

Рис. 1. Архитектура ANN

В качестве простой модели нейронной сети был взят ANN, где используется полносвязная нейронная сеть (MLP) (Рис. 1). Общее количество параметров модели составляет 3137.

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv1d (Conv1D)	(None, 6, 32)	96
conv1d_1 (Conv1D)	(None, 5, 16)	1,040
flatten (Flatten)	(None, 80)	0
dense_4 (Dense)	(None, 16)	1,296
dense_5 (Dense)	(None, 1)	17

Рис. 2. Архитектура CNN

В качестве простой модели был взят CNN с количеством параметров 2449. Данная нейронная сеть использует свертки для поиска локальных признаков. (Рис. 2).

Layer (type)	Output Shape	Param #
lstm (LSTM)	(None, 32)	4,352
dense_6 (Dense)	(None, 16)	528
dense_7 (Dense)	(None, 1)	17

Рис. 3. Архитектура RNN

В качестве RNN был взят LSTM, где модель предсказывает рейтинг приложения по 7 признакам, интерпретируемым как последовательность длиной 7 (Рис. 3). Общее количество параметров - 4897.

В качестве классических методов машинного обучения были приведены линейная регрессия, Random Forest, XGBoost.

Линейная регрессия обычно используется для визуализации данных, и не всегда идеально подходит для задачи регрессии. Random Forest показывает баланс между скоростью обучения и качеством. XGBoost подходит для табличных данных.

На основе данных моделей мы проведем сравнительный анализ, выявим преимущества и недостатки, и выберем важные признаки для предсказаний моделей.

Результаты и обсуждение

ML зарекомендовало себя как устойчивое и развивающееся направление, однако его развитие не является полностью прямолинейным. Машинное обучение основано на выведении закономерностей из исторических наблюдений, что не гарантирует точного вывода из данных. Также, как описано в статье Barbierato E. и Gatti A. (Barbierato, 2024), можно дать прогнозы, но без объяснений причинно-следственных связей, стоящими за ними, что и снижает доверие со стороны специалистов. Тем не менее, постоянно разрабатываются подходы для компенсации недостатков, что позволяет развивать точность и внедрять в практическом плане. Ради оценки того или иного подхода, необходимы исследования и выявления недостатков разных подходов, или же, наоборот, их достоинств.

Yu J. (Yu, 2022) провели обзор 43 исследований, в которых использовались модели CNN и RNN/LSTM в области умных домов. Они обнаружили, что наибольшее внимание занимают проблемы мониторинга активности, безопасности и управления энергией. Также обсуждалось, что CNN модели больше подходят при работе с изображениями и видео, в таких типах данных данная модель показывает наибольшую эффективность. А RNN/LSTM модель больше подходит под анализ данных, отличных от CNN. Авторы прибегают к использованию обеих моделей (CNN+LSTM). Это подтверждает эффективность комбинированного подхода при анализе данных разной природы. Данный вывод может помочь при определении лучших моделей для использования анализов под другие сферы, например, при анализе данных удовлетворенности приложением.

Тем не менее, обзор состоит только из 43 статей и ограничен временными рамками (2016–2020), но в последнее время технологии, визуальные модели, значительно изменились. Кроме того, авторы отмечают, что большинство исследований не рассматривают вопросы конфиденциальности и морали использования данных в умных домах. Помимо этих потенциальных недостатков машинного обучения для предсказания результатов по датасету, отметили эти проблемы в статье Zhu M. (Zhu, 2022: 107–116) подчеркивая, что сбор точных и больших данных является трудным, но, тем не менее, необходимым для точности результатов. Помимо этого, по их работе было выявлено, что алгоритмы работают только в узких случаях и не учитывают всех сложностей и тонкостей работы с вычислением качества воды. Рассматривая другую статью Sahu S.K. (Sahu, 2023: 1956) в попытке прогнозирования фондового рынка заключили, что помощью машинного и глубокого обучения возможно выявить закономерности только частично, но результаты всё равно остаются нестабильными. Чему причинами в данном случае выступают ограниченность данных и высокая изменчивость фондового рынка.

Suleman M. (Suleman, 2019: 57–61) проводили исследования также по найденному датасету в Kaggle. В их работе авторы провели исследования по предсказанию приложений в Google Play Store, с использованием алгоритмов машинного обучения фокусируясь на факторы влияния на рейтинги приложений с использованием

регрессионной модели. Датасет состоит из 10000 приложений с разделением данных на 75 % для обучения и 25 % данных для прогнозирования и тестинга. В работе были применены алгоритмы MATLAB 2018 (Regression Learner app), включая Regression Trees (Fine, Medium, Coarse), SVM (Linear, Quadratic, Cubic, Gaussian), Ensemble methods и Gaussian Process Regression. В качестве оценки результатов авторы использовали RMSE, R-Squared, MSE, MAE. По их заключению Fine Tree точнее показывает результаты (RMSE 0.33, R-Squared 0.52). На основе их исследований, можно заключить, что предсказать рейтинг с помощью машинного обучения возможно со средней долей вероятности.

Способность автоматически извлекать сложные представления из больших объемов данных отличает глубокое обучение от традиционного машинного обучения Тае М.М. (Taye, 2023: 91). Это область искусственного интеллекта, которая быстро развивается, поэтому глубокое обучение лучше подходит для анализа найденного датасета и оно будет братья за основу в методологии. Так, нейронные сети уже показали хорошие результаты в исследовании Somers A. и Black B.J в медицинском применении (Somers, 2025: 056036), но с большим датасетом.

Исходя из матрицы корреляций (Рис. 4), видно, что сильных зависимостей между признаками нет, помимо зависимости между жанром и категорией, где корреляция имеет значение 0.78. Все признаки почти не коррелируют с рейтингом. Это говорит о том, что линейные модели и ANN будут слабыми.

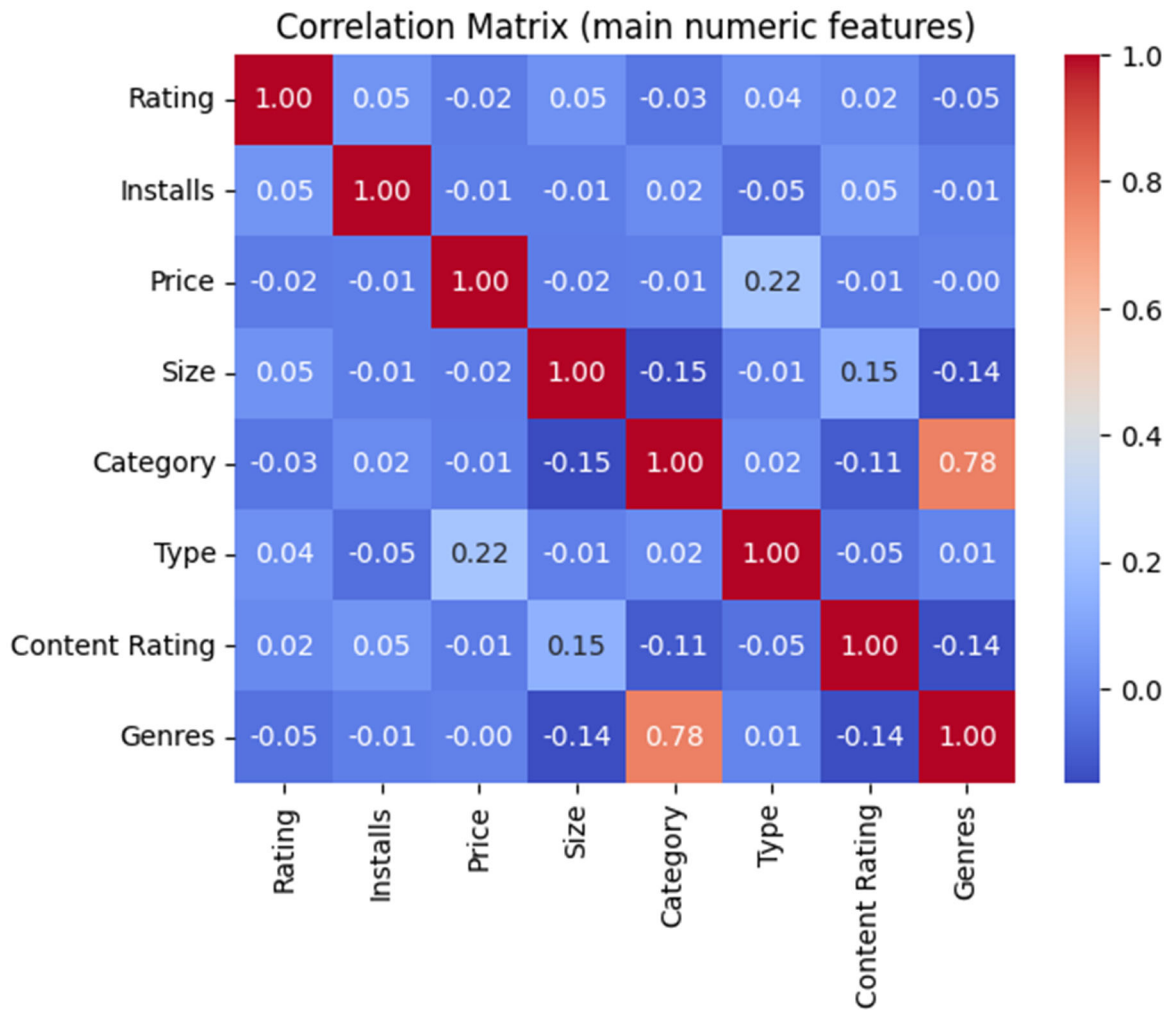


Рис. 4. Матрица корреляций признаков

Поэтому модели, которые хорошо справляются с нелинейными зависимостями, подойдут лучше всего.

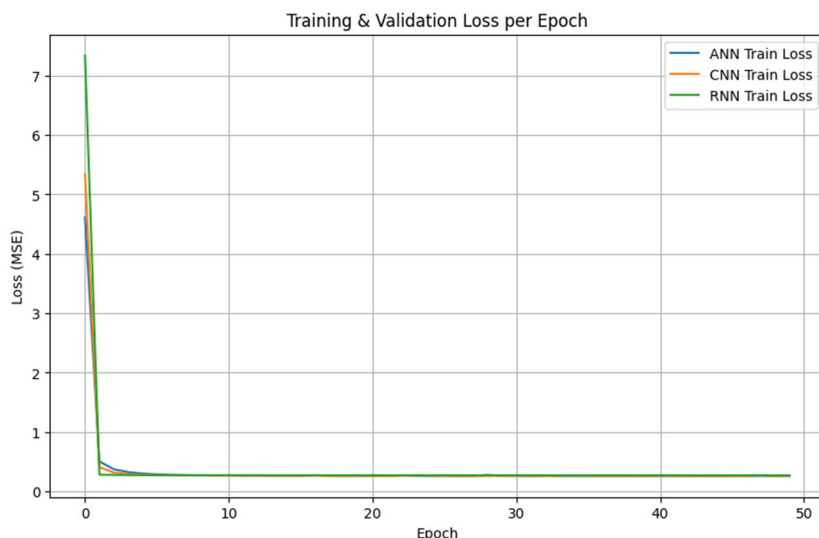


Рис. 5. История обучения ANN, CNN, RNN

Поскольку данные имели табличный и относительно простой характер, в отличие от изображений и временных рядов, все модели продемонстрировали схожие кривые обучения (Рисунок 5). Для тренировки хватило бы 5 эпох.

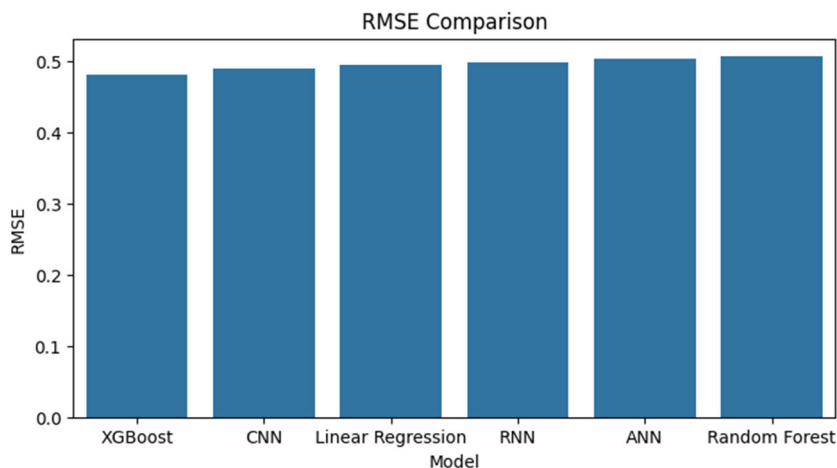


Рис. 6. Сравнение среднеквадратических ошибок моделей

Исходя из Рисунка 6, XGBoost показал наилучший, хотя и незначительно, результат по RMSE.

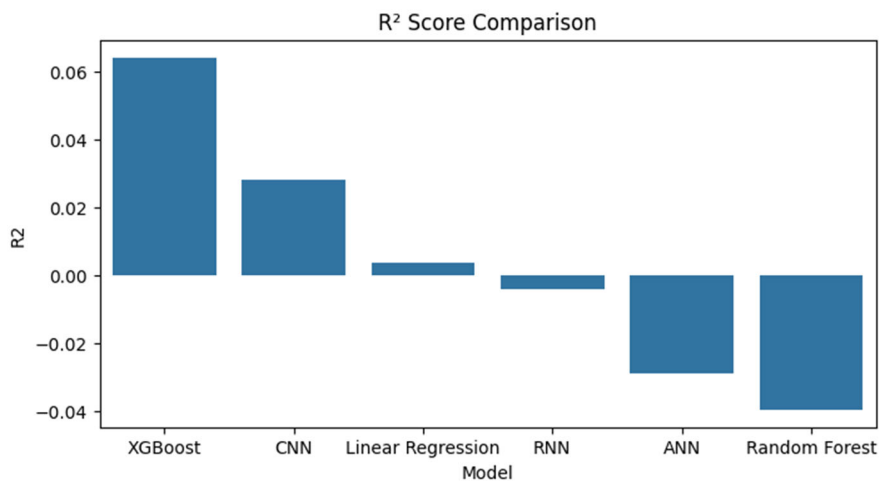


Рис. 7. Сравнение коэффициента детерминации

Исходя из Рисунка 7, XGBoost модель, которая лучше объясняет дисперсию, CNN - средний результат, тем временем как остальные модели хуже. Random Forest - хуже всего из-за переобучения.

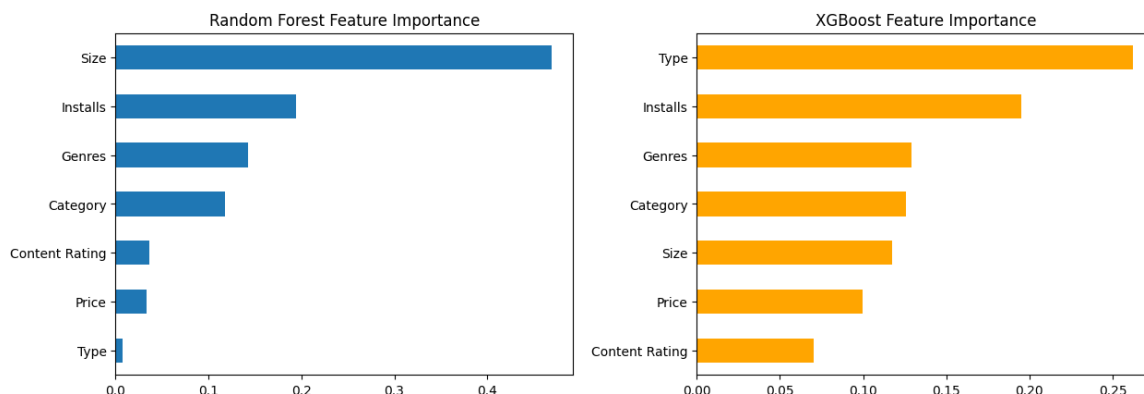


Рис. 8. Feature importance of Random Forest and XGBoost

Были проведены сравнения важностей особенностей Random Forest и XGBoost (Рисунок 8). Исходя из метрик RMSE и R2, нам стоит доверять XGBoost, что говорит о том, что такие признаки, как “type”, “installs”, “genres”, “category”, и другие, указанные в графике, больше всего подходят для использования в моделях машинного обучения.

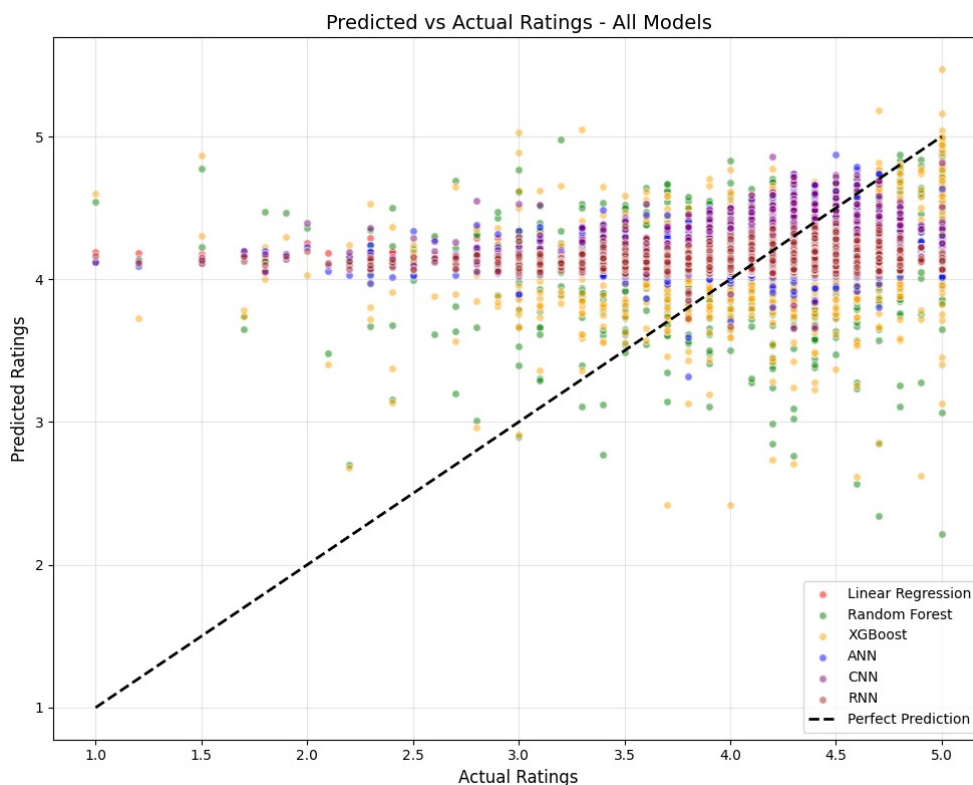


Рис. 9. Фактические и прогнозируемые результаты

Анализ по Рисунку 9 показал, что наличие редких и неравномерно распределённых данных в датасете негативно влияет на способность нейронной сети корректно обучаться. Модель выдаёт усреднённые предсказания и способна точно прогнозировать только рейтинги, находящиеся в диапазоне средних значений. Обнаружено, что для повышения точности требуется расширение выборки и балансировка категориальных данных.

Заключение

В ходе проведённого исследования был реализован комплекс моделей машинного и глубокого обучения для анализа предпочтений пользователей мобильных приложений и прогнозирования их рейтингов на основе данных Google Play Store. Используемый датасет включал 9366 примеров с 13 признаками, отражающими характеристики приложений, такие как категория, тип, контент-рейтинг, количество установок, цена, размер и жанры. Для обработки данных были проведены очистка, нормализация числовых признаков и one-hot кодирование категориальных признаков, что позволило повысить качество входных данных для моделей.

Реализованные модели включали классические алгоритмы машинного обучения — линейную регрессию, Random Forest и XGBoost, а также нейронные сети: ANN, CNN и LSTM. Выбор таких моделей был обусловлен целью сравнения эффективности традиционных и глубоких моделей при прогнозировании рейтингов, а также выявлением их преимуществ и ограничений в условиях работы с табличными данными и неравномерно распределёнными категориальными признаками.

Анализ матрицы корреляций показал, что большинство признаков не имеют сильной линейной зависимости с рейтингом, за исключением высокой корреляции между жанром и категорией приложения ($r = 0.78$). Это указывает на слабую предсказательную силу линейных моделей и необходимость применения алгоритмов, способных выявлять сложные нелинейные зависимости, таких как XGBoost или нейронные сети. Результаты обучения моделей показали, что при относительно простых табличных данных кривые обучения ANN, CNN и LSTM были схожи, что подтверждает возможность использования базовых архитектур нейронных сетей для предварительного анализа данных.

Сравнительный анализ моделей по метрикам RMSE и коэффициенту детерминации R^2 выявил, что наилучшие результаты показала модель XGBoost. Random Forest, несмотря на свою способность выявлять важность признаков, продемонстрировал худший результат из-за переобучения, а линейная регрессия и ANN показали ограниченную предсказательную силу. CNN продемонстрировала средние показатели, что объясняется отсутствием сложных локальных структур в табличных данных, где свёрточные операции не дают значительного преимущества.

Особое внимание было уделено анализу важности признаков (feature importance). По результатам XGBoost и Random Forest, наибольшее влияние на рейтинг оказали такие признаки, как тип приложения, количество установок, жанры и категория. Эти признаки могут служить основой для формирования стратегий персонализации интерфейса и улучшения пользовательского опыта. В частности, понимание того, какие категории или жанры наиболее востребованы, может помочь разработчикам оптимизировать контент и функциональные возможности приложений, повышая удовлетворенность пользователей.

Анализ фактических и прогнозируемых результатов выявил, что нейронные сети в условиях неравномерного распределения данных имеют тенденцию выдавать усреднённые предсказания. Модель способна точно прогнозировать лишь средние значения рейтингов, что ограничивает её применимость для предсказания экстремально высоких или низких оценок. Этот вывод подтверждает необходимость расширения объёма данных, балансировки категориальных признаков и разработки методов работы с редкими значениями для повышения точности глубоких моделей.

Сравнение результатов с предыдущими исследованиями (Suleman, 2019; Yu, 2022; Somers, 2025) показало, что использование алгоритмов глубокого обучения для прогнозирования рейтингов приложений является оправданным, особенно при анализе сложных и нелинейных зависимостей. Однако, как и в исследованиях других авторов, точность моделей ограничена характером данных и их распределением, а также отсутствием дополнительных факторов, которые могут влиять на пользовательские оценки, таких как пользовательские отзывы, время использования приложения и качество

обновлений.

Таким образом, ключевые выводы исследования включают:

- Эффективность моделей: XGBoost показал наилучшие результаты при прогнозировании рейтингов приложений на табличных данных. Нейронные сети могут быть полезны, но их точность ограничена из-за малой выборки и неравномерности данных.

- Важность признаков: Наибольшее влияние на рейтинг оказали признаки типа приложения, количество установок, категория и жанры, что может быть использовано для персонализации интерфейсов и повышения вовлеченности пользователей.

- Ограничения: Основными ограничениями исследования являются небольшое количество данных для редких категорий, неравномерное распределение признаков и отсутствие дополнительных факторов, которые могли бы усилить точность моделей.

Практическая значимость: Результаты исследования могут быть использованы разработчиками мобильных приложений для оптимизации пользовательского интерфейса, определения приоритетных категорий и жанров, а также для разработки систем персонализированных рекомендаций. Прогнозирование рейтингов позволяет заранее оценить потенциальную популярность приложения и скорректировать стратегию его продвижения.

Направления для дальнейших исследований: Для повышения точности прогнозирования рекомендуется: расширить выборку данных, включив более редкие и новые приложения; учитывать дополнительные факторы, такие как отзывы пользователей, частота обновлений и поведение пользователей внутри приложения; использовать методы балансировки данных для категориальных признаков; исследовать возможности ансамблирования моделей глубокого и классического обучения.

В целом, проведённая работа демонстрирует, что использование моделей глубокого обучения и современных алгоритмов машинного обучения предоставляет возможности для более глубокого понимания поведения пользователей и прогнозирования их оценок мобильных приложений. Несмотря на ограничения, выявленные закономерности и важные признаки могут стать основой для разработки более персонализированных, эффективных и привлекательных цифровых продуктов, что способствует повышению вовлеченности пользователей и улучшению пользовательского опыта на мобильных платформах.

ЛИТЕРАТУРА

Bell, 2022 — Bell J. What Is Machine Learning? // Machine Learning and the City. — John Wiley & Sons, Ltd. — 2022. — Pp. 207–216. [Eng.]

Luczak, 2022 — Luczak A., McNaughton B.L., Kubo Y. Neurons learn by predicting future activity // Nat. Mach. Intell. — Nature Publishing Group, — 2022. — Vol. 4. — №1. — Pp. 62–72. [Eng.]

Sharifani, 2023 — Sharifani K., Amini M. Machine Learning and Deep Learning: A Review of Methods and Applications. // World Information Technology and Engineering Journal. — 2023. — Volume 10. — Issue 07. — Pp. 3897–3904. [Eng.]

Dina, 2021 — Dina A.S., Manivannan D. Intrusion detection based on Machine Learning techniques in computer networks // Internet Things. — 2021. — Vol. 16. — P. 100462. [Eng.]

Sharifani, 2022 — Sharifani K., Operating Machine Learning across Natural Language Processing Techniques for Improvement of Fabricated News Model. // International Journal of Science and Information System Research. — 2022. — Volume 12. — Issue 9. — Pp. 20–44. [Eng.]

Sarker, 2021 — Sarker I.H. Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions // SN Comput. Sci. — 2021. — Vol. 2. — №3. — P. 160. [Eng.]

Janiesch, 2021 — Janiesch C., Zscheck P., Heinrich K. Machine learning and deep learning // Electron. Mark. — 2021. — Vol. 31. — №3. — Pp. 685–695. [Eng.]

Barbierato, 2024 — Barbierato E., Gatti A. The Challenges of Machine Learning: A Critical Review // Electronics. — Multidisciplinary Digital Publishing Institute. — 2024. — Vol. 13. — №2. — Pp. 416. [Eng.]

Yu, 2022 — Yu J., de Antonio A., Villalba-Mora E. Deep Learning (CNN, RNN) Applications for Smart Homes: A Systematic Review // Computers. — Multidisciplinary Digital Publishing Institute. — 2022. — Vol. 11. — №2. — P. 26. [Eng.]

Zhu, 2022 — Zhu M., A review of the application of machine learning in water quality evaluation // Eco-Environ. Health. — 2022. — Vol. 1. — №2. — Pp. 107–116. [Eng.]

Sahu, 2023 — Sahu S.K., Mokhadde A., Bokde N.D. An Overview of Machine Learning, Deep Learning, and Reinforcement Learning-Based Techniques in Quantitative Finance: Recent Progress and Challenges // Appl. Sci. — Multidisciplinary Digital Publishing Institute, — 2023. — Vol. 13. — №3. — P. 1956. [Eng.]

Suleman, 2019 — Suleman M., Malik A., Hussain S.S. Google play store app ranking prediction using machine learning algorithm // Proceedings of the International Conference on Data Science 2019, 7-9 February. — 2019. — Pp. 57–61. [Eng.]

Taye, 2023 — Taye M.M. Understanding of Machine Learning with Deep Learning: Architectures, Workflow, Applications and Future Directions // Computers. — Multidisciplinary Digital Publishing Institute. — 2023. — Vol. 12. — №5. — P. 91. [Eng.]

Somers, 2025 — Somers A., Black B.J. Co-cultured sensory neuron classification using extracellular electrophysiology and machine learning approaches for enhancing analgesic screening // J. Neural Eng. — IOP Publishing. — 2025. — Vol. 22. — №5. — P. 056036. [Eng.]

Google Play Store Apps, 2025 — Google Play Store Apps [Electronic resource]. — URL: <https://www.kaggle.com/datasets/lava18/google-play-store-apps> (accessed: 20.08.2025). [Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is. 2. Number 86 (2025). Pp. 20–30
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.002>
УДК 334.7

THE CURRENT STATE OF THE INFRASTRUCTURE OF THE AIRPORTS OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

*I. Asilbekova, G. Muratbekova, Z. Konakbai**
Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: z.konakbai@agakaz.kz

Indira Asilbekova — c.t.s., Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

E-mail: a.indira71@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8988-9910>;

Gulzhan Muratbekova — c.t.s., Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

E-mail: g.muratbekova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-0005-0470>;

Zarina Konakbai — c.t.s., Academy of Civil Aviation, Almaty, Kazakhstan

E-mail: z.konakbai@agakaz.kz, <https://orcid.org/0009-0002-4370-9397>.

© I. Asilbekova, G. Muratbekova, Z. Konakbai

Abstract. The article presents a comprehensive analysis of the current state and development of airport infrastructure in the Republic of Kazakhstan, which is a key element of the national transport system and an important factor for the country's economic growth. Airports provide not only domestic and international mobility but also contribute to the development of tourism, international trade, and Kazakhstan's integration into the global transport network. In recent years, passenger and cargo air traffic volumes have increased significantly, creating higher demands for airport infrastructure modernization and implementation of international safety standards, including ICAO and IATA. The aim of the study is to assess the current state of Kazakhstan's airport infrastructure, identify problem areas, and develop strategic directions for its further development. The research objectives include examining the technical condition of runways and terminals, analyzing airport management efficiency, conducting comparative analysis with international practices, determining modernization priorities, and developing recommendations to enhance the sector's competitiveness. The results revealed a high level of wear in regional airport infrastructure, insufficient modern equipment, a significant concentration of passenger flow in three major aviation hubs, and low private investment attraction. The analysis also highlighted the need for digital technology integration, management optimization, and implementation of public-private partnership mechanisms. Sustainable development of Kazakhstan's airport network is achievable through comprehensive infrastructure modernization, implementation of international safety standards, digitalization of processes, and investment stimulation, which will improve passenger service quality, ensure effective management of the aviation sector, and strengthen the country's position as a transport hub between Europe and Asia.

Keywords: airport, infrastructure, safety, air transportation, modernization, Kazakhstan, transport

For citation: I. Asilbekova, G. Muratbekova, Z. Konakbai (2025). The current state of the infrastructure of the airports of the Republic of Kazakhstan (In Russ.)//Industrial Transport of Kazakhstan. Vol. 22. No. 86. Pp. 00–00. <https://doi.org/10.58420.ptk.2025.86.02.002> (In Eng.).

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

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ӘУЕЖАЙЛАРЫНЫҢ ИНФРАҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ АҒЫМДАҒЫ ЖАЙ-КҮЙІ

*И. Асильбекова, Г. Муратбекова, З. Қонақбай**

Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан.

E-mail: z.konakbai@agakaz.kz

Индира Асильбекова — т.ғ.к., Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан

E-mail: a.indira71@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8988-9910>;

Гульжан Муратбекова — т.ғ.к., Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан

E-mail: g.muratbekova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-0005-0470>;

Зарина Қонақбай — т.ғ.к., Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан

E-mail: z.konakbai@agakaz.kz, <https://orcid.org/0009-0002-4370-9397>.

© И. Асильбекова, Г. Муратбекова, З. Қонақбай

Аннотация. Мақала Қазақстан Республикасының әуежайларының инфрақұрылымының қазіргі жағдайын және дамуын кешенді талдауға арналған. Әуежайлар ұлттық транспорт жүйесінің негізгі элементі болып табылады және елдің экономикалық өсіміне маңызды әсер етеді. Олар тек ішкі және халықаралық халық қозғалысын қамтамасыз етіп қана қоймай, туризмнің, халықаралық сауданың дамуына және Қазақстанның әлемдік транспорт желісіне интеграциясына үлес қосады. Соңғы жылдары жолаушылар мен жүк әуе тасымалы көлемдері айтарлықтай өсті, бұл әуежай инфрақұрылымын жаңарту мен халықаралық қауіпсіздік стандарттарын, соның ішінде ICAO және IATA стандарттарын енгізу қажеттілігін арттырды. Зерттеудің мақсаты – Қазақстан әуежайлары инфрақұрылымының қазіргі жағдайын бағалау, проблемалық аймақтарды анықтау және оның дамуының стратегиялық бағыттарын анықтау. Зерттеу міндеттеріне ұшу-қону жолағы мен терминалдардың техникалық жағдайын зерттеу, әуежайларды басқару тиімділігін талдау, халықаралық тәжірибемен салыстырмалы талдау жасау, жаңартудың басым бағыттарын анықтау және сала бәсекеге қабілеттілігін арттыру бойынша ұсыныстар әзірлеу кіреді. Зерттеу нәтижелері өңірлік әуежай инфрақұрылымының едәуір тозғанын, заманауи жабдықтардың жетіспейтінін, жолаушылар ағымының үш ірі авиаузелде шоғырланғанын және жеке инвестицияларды тарту деңгейінің төмен екенін көрсетті. Анализ сондай-ақ цифрлық технологияларды интеграциялау, басқаруды оңтайландыру және мемлекеттік-жекешелік серіктестік механизмдерін енгізу қажеттілігін анықтады. Қазақстан әуежай желісінің тұрақты дамуы инфрақұрылымды кешенді жаңарту, халықаралық қауіпсіздік стандарттарын енгізу, процестерді цифрландыру және инвестицияларды ынталандыру арқылы мүмкін, бұл жолаушыларға қызмет көрсету сапасын арттырады, авиация саласын тиімді басқарады және елдің Еуропа мен Азия арасындағы транспорт хабы ретіндегі позициясын нығайтады.

Түйін сөздер: әуежай, инфрақұрылым, қауіпсіздік, әуе тасымалы, жаңарту, Қазақстан, көлік

Дәйексөздер үшін: И. Асильбекова, Г. Муратбекова, З. Қонақбай (2025). Қазақстан Республикасы әуежайларының инфрақұрылымының ағымдағы жай-күйі // Қазақстан өндіріс көлігі. Том. 22. № 86. 00–00 бет. <https://doi.org/10.58420.ptk.2025.86.02.002> (Ағыл. тіл.).

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОПОРТОВ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

*И. Асильбекова, Г. Муратбекова, З. Қонақбай**

Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан.

E-mail: z.konakbai@agakaz.kz

Индира Асильбекова — к.т.н., Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

E-mail: a.indira71@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-8988-9910>;

Гульжан Муратбекова — к.т.н., Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

E-mail: g.muratbekova@alt.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-0005-0470>;

Зарина Қонақбай — к.т.н., Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

E-mail: z.konakbai@agakaz.kz, <https://orcid.org/0009-0002-4370-9397>.

© И. Асильбекова, Г. Муратбекова, З. Қонақбай

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу состояния и развития инфраструктуры аэропортов Республики Казахстан, которые являются ключевым элементом национальной транспортной системы и важным фактором экономического роста страны. Аэропорты обеспечивают не только внутреннюю и международную мобильность населения, но и способствуют развитию туризма, международной торговли и интеграции Казахстана в мировую транспортную сеть. За последние годы объёмы пассажирских и грузовых авиаперевозок значительно увеличились, что создаёт повышенные требования к модернизации аэропортовой инфраструктуры и внедрению международных стандартов безопасности, включая ИКАО и IATA. Цель исследования заключается в оценке текущего состояния инфраструктуры аэропортов Казахстана, выявлении проблемных зон и разработке стратегических направлений её дальнейшего развития. В задачи исследования включены изучение технического состояния взлётно-посадочных полос и терминалов, анализ эффективности управления аэропортами, сравнительный анализ с международными практиками, определение приоритетов модернизации и разработка рекомендаций по повышению конкурентоспособности отрасли. Результаты исследования показали высокий износ инфраструктуры региональных аэропортов, недостаточное оснащение современным оборудованием, значительную концентрацию пассажиропотока в трёх крупнейших авиаузлах и низкий уровень привлечения частных инвестиций. Анализ также выявил потребность в интеграции цифровых технологий, оптимизации управления и внедрении механизмов государственно-частного партнёрства. Устойчивое развитие аэропортовой сети Казахстана возможно при комплексной модернизации инфраструктуры, внедрении международных стандартов безопасности, цифровизации процессов и стимулировании инвестиций, что обеспечит повышение качества обслуживания пассажиров, эффективное управление авиационной отраслью и укрепление позиций страны как транспортного хаба между Европой и Азией.

Ключевые слова: аэропорт, инфраструктура, безопасность, авиаперевозки, модернизация, Казахстан, транспорт

Для цитирования: И. Асильбекова, Г. Муратбекова, З. Қонақбай (2025). Текущее состояние инфраструктуры аэропортов Республики Казахстан // Помышленный транспорт Казахстана. Т. 22. No. 86. Стр. 00–00. <https://doi.org/10.58420.ptk.2025.86.02.002> (На англ.).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

The development of airport infrastructure is one of the key directions for ensuring Kazakhstan's economic growth and its integration into the global transport system (Kazakhstan-2050 Strategy, 2012: 1–5; On Approval of the State Infrastructure Development Programme "Nurly Zhol", 2019: 2–4). Air transport plays an important role in strengthening international relations, developing tourism, and increasing population mobility. Over the past decade, the volume of passenger air transportation in Kazakhstan has increased significantly, indicating growing demand for modern and safe airports (Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan, 2024: 15–31).

Despite positive trends, the infrastructure of Kazakhstan's airports remains unevenly developed. Many regional airports are characterized by a high level of fixed asset deterioration, outdated runways, and non-compliance with international safety and service standards (Nurpeisov, 2020: 48–55). This reduces the competitiveness of the domestic aviation sector compared to neighboring countries actively investing in airport modernization, such as Russia, Turkey, and the United Arab Emirates.

The selection of this topic is conditioned by the strategic importance of airport infrastructure for the country's socioeconomic development. Airport modernization facilitates the attraction of investment, growth of tourism, and development of logistics services. Analysis of the scientific literature shows that, while individual studies addressing Kazakhstan's transport infrastructure exist, comprehensive works focused specifically on airport development are insufficiently represented.

The relevance of the topic is determined by the need to modernize and develop airports in accordance with ICAO and IATA international standards, to improve passenger service quality, and to strengthen Kazakhstan's position as a transport hub between Europe and Asia.

The object of investigation is the airport system of the Republic of Kazakhstan. The subject of investigation is the infrastructural development and modernization of Kazakhstan's airports. The aim of the research is to analyze the current state of Kazakhstan's airport infrastructure and to identify the priority directions for its further development.

The research tasks are as follows: to examine the current state and key development indicators of Kazakhstan's airports; to identify infrastructural, technical, and managerial problems constraining their operational efficiency; to analyze international experience in airport management and development; and to develop proposals for improving Kazakhstan's airport infrastructure and enhancing its competitiveness.

The research hypothesis holds that the sustainable development of Kazakhstan's airport network is achievable under conditions of infrastructure modernization based on the principles of public-private partnership, the implementation of international safety standards, and the optimization of the regional airport network.

Materials and Methods.

The methodological basis of the study comprises works by domestic and international scholars in the field of transport economics and airport infrastructure management. The study employs general scientific and specialized analytical methods, providing a comprehensive examination of the state and development directions of Kazakhstan's airport network.

The following research methods were applied: comparative analysis, enabling the comparison of Kazakhstan's airport development indicators with international standards and practices; statistical analysis, based on data from the Civil Aviation Committee of the Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan and reports of the International Civil Aviation Organization (ICAO); a systems approach, facilitating the identification of relationships between the infrastructural condition of airports, air traffic volumes, and investment levels; and content analysis of regulatory documents, including government programmes for transport infrastructure development and ICAO standards governing

airport activities.

The research stages included: (1) collection and processing of data on the current state of Kazakhstan's airport infrastructure, including runway lengths, passenger and cargo traffic volumes, and technical equipment levels; (2) comparative analysis of Kazakhstan's airport indicators against international benchmarks, such as the airports of Turkey, the UAE, and Singapore, distinguished by high efficiency and service quality; (3) identification of problem areas in the functioning of domestic airports, including infrastructural constraints, investment shortfalls, and staffing challenges; and (4) formulation of recommendations for improving the competitiveness of Kazakhstan's airport network, based on international experience and sustainable development principles. The empirical base of the study rests on official statistical data from the Civil Aviation Committee, reports of the Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan, ICAO documents, and materials from scientific publications addressing airport and transport infrastructure development.

Results and Discussion.

Issues related to the development and functioning of airport infrastructure have been examined in works by numerous international and domestic researchers. In the international literature, particular attention is devoted to the economic aspects of airport management, modernization, and sustainable development. Graham notes that effective airport functioning is determined not only by the technical condition of runways and terminals but also by the level of management organization, service quality, and revenue diversification (Graham, 2014: 67–74). A similar position is held by Doganis, who emphasizes that airport development must be accompanied by the optimization of financial flows and the adoption of market-based management instruments (Doganis, 2019: 95–100).

ICAO research demonstrates that improving airport efficiency is directly related to the implementation of international safety standards, digital technologies, and infrastructure monitoring systems (ICAO, 2021: 29–32). According to ICAO, sustainable airport development requires a balance between economic benefit, environmental responsibility, and social significance (ICAO, 2021: 34–39).

In the domestic scientific literature, questions of Kazakhstan's airport infrastructure development are covered less systematically. Nurpeisov notes that many regional airports operate at the limit of their technical capabilities, and the renewal of equipment and terminal reconstruction require substantial investment (Nurpeisov, 2020: 53–59). Abdrakhmanova identifies digitalization of the aviation sector, personnel development, and the adoption of innovative service technologies as key development factors (Abdrakhmanova, 2022: 41–45).

Aspanova emphasizes the need to integrate public-private partnership principles in the modernization of Kazakhstan's airports, since budget financing does not ensure the long-term sustainability of projects (Aspanova, 2025: 403–409). Similar conclusions are presented in the analytical reports of the Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan (Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan, 2024: 18–20), where the development of the transport-logistics complex, including airports, is identified as a priority area of state policy.

A comparative analysis of the scientific literature reveals a research gap: most domestic publications focus on individual aspects of airport functioning — technical condition, traffic volumes, or safety issues — while comprehensive studies integrating infrastructural, economic, and managerial dimensions remain insufficiently represented (Kasymbekova et al., 2019: 99–102). The present study is directed at filling this gap and at developing scientifically grounded proposals for improving the country's airport infrastructure.

Analysis of the state of Kazakhstan's airport infrastructure (Table 1) shows that the country operates 20 international and 27 regional airports, a significant portion of which require modernization and reconstruction (Ministry of Industry and Infrastructure Development of the

Republic of Kazakhstan, 2024: 25–29). According to data from the Civil Aviation Committee, the level of runway deterioration at a number of regional airports exceeds 60 per cent, which adversely affects flight safety and capacity (Nurpeisov, 2020: 55–59).

Table 1 – Current state of Kazakhstan’s airports

Airport	Passenger flow (thou.)	Runway(s)	No. of destinations	Notes
Aktau	1,023.9 (2018)	Asphalt-concrete 3060×60 m	15	Hub of SCAT airline
Atyrau	644.6 (2016)	Asphalt 2800×70 m Asphalt-concrete 3060×60 m Unpaved 1500×100 m	10	Terminal reconstruction commenced; budget 1.5 bn KZT. Hub of Bek Air
Uralsk	220 (2018)	Cement-concrete 2800×45 m Unpaved 2800×100 m	6	
Aktobe	412.2 (2018)	Reinforced concrete 3203×45 m	6	
Kostanay	151.7 (2017)	Asphalt-concrete 2800×45 m Unpaved 2750×100 m Unpaved 1600×100 m	4	Main runway reconstruction completed; passenger throughput expected to reach 250,000/yr
Petropavlovsk	14 (2018)	Asphalt-concrete 2800×45 m	3	
Kokshetau	21.4 (2018)	Asphalt-concrete 2800×60 m	3	Official branch of Nursultan Nazarbayev International Airport
Nursultan Nazarbayev (Astana)	4,545.3 (2018)	Asphalt-concrete 3500×45 m	41 (15 domestic, 26 international)	Main airport of the Republic of Kazakhstan; hub for Air Astana and SCAT
Pavlodar	177 (2016)	Asphalt-concrete 2500×45 m	4	
Sary-Arka (Karaganda)	222.4 (2016)	Concrete 3600×60 m	6	Low-cost carrier FlyArystan planned to designate it as hub in 2020
Semey	66 (2016)	Concrete 3100×45 m Concrete 1600×100 m	4 (no intl.routes)	Terminal and runway reconstructed in 2018; total cost 10.715 bn KZT; passenger throughput expected to reach 100,000/yr
Ust-Kamenogorsk	286.6 (2016)	Asphalt-concrete 2510×43 m (to become 2800×45 m after reconstruction) Unpaved 1700×50 m	7	Runway and terminal reconstruction in progress; total project cost 10.626 bn KZT; completion expected 2021
Almaty	5,686.9 (2016)	Asphalt-concrete 4400×45 m Asphalt-concrete 4500×45 m	45 (17 domestic, 28 international)	Hub for Air Astana, SCAT, and QazaqAir
Aulie-Ata (Taraz)	63 (2018)	Asphalt-concrete 3500×60 m Unpaved 2400×100 m	3	Airport began 24-hour operations for first time in February 2019
Shymkent	817 (2018)	Concrete 3300×45 m	5	Planned passenger throughput increase to 3,500,000/yr
Korkyt Ata (Kyzylorda)	212 (2017)	Asphalt-concrete 3200×45 m Unpaved 2700×85 m	3	Reconstruction in progress; estimated cost 7.5 bn KZT

According to statistical data, between 2015 and 2023 the volume of passenger throughput through Kazakhstan's airports nearly doubled, rising from 8.7 million to 16.9 million persons (Key Socioeconomic Indicators of the Republic of Kazakhstan). The primary load falls on the three largest airports — Nursultan Nazarbayev (Astana), Almaty, and Shymkent — whose combined share amounts to approximately 72 per cent of total passenger flow (Aspanova, 2025: 406–410). Regional airports, by contrast, serve limited traffic volumes, attributable to low flight frequency, insufficient infrastructure development, and high aircraft handling costs.

The comparative analysis established that, by the level of technical equipment and service quality, Kazakhstan's airports lag behind ICAO international standards across a number of indicators. In particular, automated passenger flow control systems, modern airfield lighting equipment, and digital air traffic management systems have been implemented in fewer than 30 per cent of airports (ICAO, 2021: 37–39). For comparison, equivalent indicators at airports in Turkey and Singapore exceed 80 per cent (Graham, 2014: 115–120).

In addition, Kazakhstan maintains a high dependence of the airport sector on state financing. Despite the launch of a number of public-private partnership projects, the share of private investment in airport modernization does not exceed 25 per cent (Abdrakhmanova, 2022: 44–45). The absence of systemic incentives for investors and insufficient transparency in concession agreement procedures impede the development of regional airports (Aspanova, 2025: 407–409).

At the same time, recent years have seen positive dynamics in the modernization of major aviation hub infrastructure. An example is the reconstruction of Astana airport, where new passenger terminals have been commissioned and modern baggage processing and security control technologies have been adopted. Similar projects are being implemented at the airports of Almaty and Kyzylorda.

The research findings confirm the conclusions of international authors that airport efficiency is determined not only by the physical condition of infrastructure but also by management quality, strategic planning, and the adoption of innovations. For Kazakhstan, the key direction is the development of regional airports ensuring domestic transportation and access to remote territories.

The analysis thus identified three main problem clusters: infrastructural deterioration — a high degree of physical ageing of runways, terminals, and navigation equipment; institutional constraints — insufficient investment attractiveness of the sector and weak implementation of PPP mechanisms; and uneven development — concentration of passenger flow at three major airports, with the potential of regional airports remaining underutilized.

On the basis of the analysis conducted, the following structure of strategic tasks for Kazakhstan's airports is proposed (Figure 1):

STRATEGIC TASKS FOR AIRPORT DEVELOPMENT IN KAZAKHSTAN			
Strategic Task	Short-term	Medium-term	Long-term
1. Improve the airport network	Define airport roles and development priorities in line with Kazakhstan's national strategy and market needs		
2. Adopt international flight safety and aviation security standards	Airports must ensure safe operations, controlled and certified in accordance with international standards (ICAO/IATA)		
3. Adequate and flexible airport service level	Aerodrome and terminal expansion must always be determined by market demand	1. Airports must progressively upgrade equipment and systems to meet market needs (IATA) without disrupting effective operations 2. Ground handling rules must be amended to allow specialized ground handling agents to enter commercial relations with airlines under airport licensing	A dialogue structure among key industry stakeholders must be established for continuous comprehensive evaluation and effective infrastructure management
4. Define airport development strategy	Establish regulatory bodies with authorized rights and control; create a dialogue structure among airports, airlines, and government bodies to synchronize their strategies		

Fig. 1. Strategic tasks for airport development in Kazakhstan

The strategic tasks presented in Figure 1 reflect the necessity of a comprehensive and interconnected approach to the modernization of Kazakhstan's airport infrastructure. The conducted analysis demonstrated that the existing problems of the national airport network cannot be resolved through isolated technical reconstruction projects alone. Sustainable development requires simultaneous transformation of infrastructural, institutional, technological, financial, and managerial components of the aviation sector. In this context, the proposed structure of strategic tasks represents a systemic model aimed at ensuring the long-term competitiveness and operational sustainability of Kazakhstan's airports.

One of the central strategic directions is the modernization of airport infrastructure facilities, including runways, terminals, navigation systems, airfield lighting equipment, and ground handling complexes. Many regional airports currently operate with a high degree of physical deterioration, limiting aircraft acceptance capabilities and negatively affecting operational safety indicators. The reconstruction and extension of runways, modernization of terminal complexes, and replacement of obsolete navigation equipment are therefore essential prerequisites for increasing airport throughput capacity and ensuring compliance with ICAO and IATA standards. Modernization of infrastructure additionally creates opportunities for expanding international flight geography and attracting new air carriers.

Equally important is the task of implementing digital technologies and intelligent airport management systems. International experience demonstrates that the efficiency of modern airports increasingly depends on the level of digital integration of operational processes. The introduction of automated passenger flow management systems, biometric identification technologies, digital baggage handling systems, and intelligent dispatch coordination platforms significantly improves operational reliability and passenger service quality. Digitalization additionally enables airports to optimize resource allocation, reduce aircraft turnaround times, minimize delays, and improve overall transport efficiency.

Particular significance is attached to the development of smart airport concepts based on Industry 4.0 technologies. Within such systems, airport infrastructure functions as an integrated digital ecosystem where operational data from terminals, airfield systems, security systems, and passenger services are processed in real time using artificial intelligence and big data analytics. The implementation of predictive maintenance systems for airport equipment and infrastructure allows early identification of technical failures and optimization of maintenance schedules, thereby reducing operational risks and infrastructure downtime.

Another key strategic task concerns the attraction of private investment and expansion of public-private partnership (PPP) mechanisms. The conducted analysis showed that excessive dependence on state financing constrains the pace of modernization projects and limits opportunities for technological renewal, especially in regional airports. International practice demonstrates that PPP mechanisms are among the most effective instruments for financing large-scale infrastructure projects. Their implementation allows the state to reduce budgetary burden while enabling private investors to participate in airport management, construction, and operation. However, for PPP mechanisms to function effectively in Kazakhstan, it is necessary to improve the legal framework governing concession agreements, ensure transparency of investment procedures, and establish long-term guarantees for investors.

An important strategic direction is the balanced development of regional airport infrastructure. At present, the majority of passenger traffic is concentrated in several large aviation hubs, while many regional airports remain underutilized despite their important socioeconomic role. The modernization of regional airports is necessary for improving territorial accessibility, increasing mobility of the population, and supporting economic development of remote regions. Expansion of domestic route networks, subsidization of socially important regional flights, and development of multimodal transport integration can significantly improve the efficiency of regional airport operations.

The development of transport-logistics functions of airports also represents a strategically important objective. Modern airports increasingly serve not only as passenger transportation facilities but also as key elements of international logistics chains. Kazakhstan's geographical position between Europe and Asia creates favorable conditions for the development of transit cargo transportation and air logistics hubs. The modernization of cargo terminals, implementation of digital customs clearance systems, and integration of airports into multimodal logistics corridors may significantly strengthen Kazakhstan's role within Eurasian transport networks.

Particular attention within the strategic framework should also be devoted to improving aviation safety and cybersecurity systems. The growing digitalization of airport operations increases dependence on information technologies and simultaneously raises the vulnerability of infrastructure to cyber threats and operational disruptions. Therefore, modernization programmes must include the implementation of advanced cybersecurity systems, intelligent surveillance technologies, automated emergency response systems, and integrated aviation safety monitoring platforms. Compliance with international aviation security standards will be a critical condition for maintaining international competitiveness and operational reliability.

Environmental sustainability constitutes another important strategic dimension of airport development. Global aviation trends increasingly emphasize the transition toward environmentally sustainable infrastructure solutions, including energy-efficient terminal buildings, renewable energy systems, waste management technologies, and reduction of greenhouse gas emissions. Kazakhstan's airport modernization strategy should therefore incorporate principles of green airport development aligned with international environmental standards and sustainable development goals. The implementation of environmentally friendly technologies will improve operational efficiency while enhancing the international image and investment attractiveness of Kazakhstan's aviation sector.

The development of human capital and professional competencies is equally important for the successful realization of modernization programmes. Advanced technological infrastructure requires highly qualified aviation specialists capable of operating digital systems, intelligent management platforms, and automated safety technologies. Consequently, strategic tasks should include modernization of aviation education systems, expansion of professional training programmes, international cooperation in personnel development, and strengthening of research and innovation capacity within the aviation sector.

Conclusion.

The conducted research demonstrated that the airport infrastructure system of the Republic of Kazakhstan occupies a strategically important position in ensuring national transport connectivity, economic growth, international integration, and regional development. Under conditions of increasing passenger mobility, globalization of transport flows, and intensifying competition among international transit corridors, the modernization of airport infrastructure becomes not only a sectoral task but also an essential element of the country's long-term socioeconomic and geopolitical strategy.

The analysis of the current state of Kazakhstan's airports confirmed that the national aviation sector has entered a stage of active transformation. Over the past decade, passenger traffic volumes have increased significantly, indicating a growing demand for air transportation services and the increasing importance of Kazakhstan as a transit territory between Europe and Asia. At the same time, the research established that the development of airport infrastructure remains highly uneven. The main concentration of passenger and cargo traffic is observed at the largest airports — Nursultan Nazarbayev (Astana), Almaty, and Shymkent — whereas a considerable number of regional airports continue to operate under conditions of insufficient technical modernization, limited investment support, and outdated operational infrastructure.

Particular attention in the study was devoted to the condition of regional airports, which play a critical role in ensuring territorial accessibility, regional mobility, and socioeconomic integration of remote regions. The obtained results demonstrate that many regional airports are characterized by significant physical deterioration of runways, obsolete airfield lighting and navigation systems, limited terminal capacity, and insufficient implementation of digital management technologies. Such limitations reduce operational efficiency, negatively affect flight safety indicators, and constrain the competitiveness of Kazakhstan's aviation sector in comparison with neighboring countries actively investing in airport modernization and technological innovation.

The comparative analysis with international airport systems in Turkey, the United Arab Emirates, and Singapore demonstrated that the effectiveness of airport infrastructure development depends not only on the physical condition of terminals and runways, but also on the quality of strategic management, the level of digitalization, operational flexibility, and the ability to attract private investment. International experience confirms that modern airports increasingly function as multifunctional transport-logistics, commercial, and technological hubs integrating passenger transportation, cargo logistics, digital services, tourism infrastructure, and smart management systems.

The research findings showed that Kazakhstan's airport sector continues to demonstrate a relatively high dependence on state financing, while the level of private investment participation remains limited. Although mechanisms of public-private partnership are gradually being introduced, their practical implementation remains constrained by insufficient transparency of concession procedures, regulatory uncertainties, and limited long-term guarantees for investors. Under such conditions, the development of an effective institutional environment for attracting domestic and foreign investment becomes one of the key priorities of state transport policy.

An important conclusion of the study is that the modernization of airport infrastructure should be considered not only as a technical reconstruction process, but also as a comprehensive transformation of management systems, operational technologies, and passenger service standards. The implementation of digital solutions — including automated passenger flow control systems, intelligent baggage handling systems, digital dispatch platforms, biometric identification technologies, and integrated airport management systems — represents a necessary condition for improving operational efficiency and compliance with ICAO and IATA international standards.

The conducted analysis additionally demonstrated that digitalization of airport management systems provides substantial operational and economic advantages. The integration of intelligent monitoring systems, predictive maintenance technologies, and automated operational control platforms allows airports to improve safety levels, optimize resource allocation, reduce operational delays, and enhance passenger service quality. In the long term, the introduction of artificial intelligence technologies, digital twins, and IoT-based infrastructure monitoring systems may become a decisive factor in the formation of "smart airports" operating within the principles of Industry 4.0 and sustainable transport development.

The research also confirmed that the sustainable development of Kazakhstan's airport network is impossible without balanced territorial planning. Excessive concentration of passenger flows in several major aviation hubs increases infrastructural pressure and limits the development potential of regional transport systems. Therefore, one of the strategic priorities should be the modernization of regional airports and the expansion of domestic air transportation networks connecting remote territories with the country's major economic centers. Such measures will contribute not only to increased mobility of the population but also to tourism development, investment attraction, labor market expansion, and strengthening of interregional economic integration.

From the perspective of transport logistics, Kazakhstan possesses significant potential for becoming a major Eurasian aviation hub due to its favorable geographical location between Europe and Asia. However, realization of this potential requires accelerated modernization of airport infrastructure, improvement of multimodal transport integration, and enhancement of service quality to international standards. Airports must increasingly function as elements of integrated transport-logistics ecosystems combining air, rail, and road transport infrastructure within unified digital management environments.

REFERENCES

- Abdrakhmanova, 2022 – Abdrakhmanova, A. (2022). Razvitie transportnoi infrastruktury Kazakhstana: analiticheskii obzor [Development of transport infrastructure of Kazakhstan: an analytical review]. Almaty: Ekonomika. 50 p. [In Russ.]
- Afonin, 2014 – Afonin, A.M., et al. (2014). Transportnaia logistika: organizatsiia perevozki gruzov [Transport logistics: organization of freight transportation]. Moscow: Forum: INFRA-M. 180 p. [In Russ.]
- Aspanova, 2025 – Aspanova, A. (2025). Gosudarstvenno-chastnoe partnerstvo v modernizatsii aeroportovoi infrastruktury Kazakhstana [Public-private partnership in the modernization of airport infrastructure of Kazakhstan]. Almaty: Transport i logistika. 420 p. [In Russ.]
- Bazaeva, 2014 – Bazaeva, B. (2014). Perevozka gruzov vozdushnym transportom [Air freight transportation]. Aviatsonnaia shkola Aeroflota. 210 p. [In Russ.]
- Doganis, 2019 – Doganis, R. (2019). The Airline Business. 4th ed. London: Routledge. 320 p. [In Eng.]
- Graham, 2014 – Graham, A. (2014). Managing Airports: An International Perspective. 4th ed. London: Routledge. 350 p. [In Eng.]
- ICAO, 2007 – ICAO. (2007). Prognoz razvitiia vozdushnogo transporta do 2025 goda [Air transport development forecast to 2025]. 65 p. [In Russ.]
- ICAO, 2020 – ICAO. (2020). Rukovodstvo po ekonomicheskim i finansovym meram po umensheniiu vliianiia vspyshki koronavirusa na aviatsiiu [Guidance on economic and financial measures to reduce the impact of the coronavirus outbreak on aviation]. Available at: <https://www.icao.int>. Accessed: 18.01.2025. [In Russ.]
- ICAO, 2021 – ICAO. (2021). Rukovodstvo po standartam i praktike upravleniia aeroportami [Manual on standards and practices for airport management]. 60 p. Available at: <https://www.icao.int>. Accessed: 19.01.2025. [In Russ.]
- Kasymbekova et al., 2019 – Kasymbekova, A., et al. (2019). Razvitie transportnoi infrastruktury Kazakhstana: opyt i perspektivy [Development of transport infrastructure of Kazakhstan: experience and prospects]. Almaty: Transport. 150 p. [In Russ.]
- Kazakhstan-2050 Strategy, 2012 – Novyi politicheskii kurs sostoavshegosia gosudarstva: Poslanie Prezidenta RK N.A. Nazarbaeva narodu Kazakhstana, Astana, 14 dekabria 2012 g. [New political course of an established state: Address of the President of the Republic of Kazakhstan N.A. Nazarbayev to the people of Kazakhstan]. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus>. Accessed: 18.01.2025. [In Russ.]
- Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan, 2024 – Statisticheskii otchet o razvitiu aviatsionnoi otrasli Kazakhstana [Statistical report on the development of the aviation sector of Kazakhstan]. Astana: MIIR RK, 2024. 60 p. Available at: <http://www.miit.gov.kz>. Accessed: 18.01.2025. [In Russ.]
- Miroshnikova, 1983 – Miroshnikova, A.V. (ed.). (1983). Ekonomika, organizatsiia i planirovanie grazhdanskoi aviatsii [Economics, organization and planning of civil aviation]. Moscow: Transport. 240 p. [In Russ.]
- Nurpeisov, 2020 – Nurpeisov, A. (2020). Infrastrukturnye problemy regionalnykh aeroportov Kazakhstana [Infrastructure problems of regional airports of Kazakhstan]. Almaty: Academy of Civil Aviation. 70 p. [In Russ.]
- On Approval of the National Project "Strong Regions — Driver of Country Development", 2021 – Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 729 of 12 October 2021. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2100000729/history>. Accessed: 16.01.2025. [In Russ.]
- On Approval of the State Infrastructure Development Programme "Nurly Zhol", 2019 – Decree of the Government of the Republic of Kazakhstan No. 1055 of 31 December 2019. Available at: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/P1900001055>. Accessed: 17.01.2025. [In Russ.]
- Ratushna, 2011 – Ratushna, A. (2011). Formirovanie mekhanizma upravleniia neaviatsionnoi deiatel'nost'iu aeroporta [Formation of a mechanism for managing the non-aviation activities of an airport]. Available at: http://www.nbu.gov.ua/ejournals/PSPE/2011_4/Ratushna_411.html. Accessed: 18.01.2025. [In Russ.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is. 2. Number 86 (2025). Pp. 31–43
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.003>

УДК 50.47.29

RESEARCH OF THE PRODUCTION CYCLE OF AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES IN DECENTRALIZED SYSTEMS

Zh. Batyrkanov

Kyrgyz Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan.
E-mail: jbatyrkanov@kstu.kg

Zhenish Batyrkanov — doctor of technical sciences, professor, Kyrgyz Technical University named after I. Razzakov, Bishkek, Kyrgyzstan
E-mail: jbatyrkanov@kstu.kg, <https://orcid.org/0000-0002-5619-7178>.

© Zh. Batyrkanov

Abstract. In modern industrial production, the optimization of technological process management is of critical importance due to the increasing complexity of production systems and higher requirements for product quality. Within the framework of Kazakhstan's Industrial-Innovative Development Program 2020–2025, the implementation of new automation methods, decentralized control systems, and the enhancement of production efficiency is a priority. The objective of this study is to develop and implement effective methods for managing technological processes using decentralized automated systems with the Trace Mode 6 software environment. The main tasks include comprehensive analysis of the production cycle; identification of ways to increase the efficiency of subsystems; modeling multi-stage processes; developing algorithms for managing emergency events and alarms; and integrating new solutions into existing control systems. The results demonstrated that decentralized control systems improve equipment reliability, reduce downtime, optimize information flows, and enhance product quality. The use of explicit decomposition methods ensures effective interaction between subsystems, achieving a synergistic effect in managing complex production processes. Tools within Trace Mode 6, such as alarm recorders and notification systems, enable preventive maintenance planning and rapid response to emergency situations. The conclusion confirms the prospects of decentralized control systems and their applicability in Kazakhstan's industry and abroad. The study shows the potential for scalability and integration with modern information technologies, opening opportunities for further optimization of production processes, increasing their efficiency and reliability.

Keywords: decentralized systems, automation, optimization, technological processes, Trace Mode, emergency events, production subsystems

For citation: Zh. Batyrkanov. Research of the production cycle of automation of technological processes in decentralized systems//Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 86. Pp. 31–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.003>

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

ОРТАЛЫҚТАНДЫРЫЛМАҒАН ЖҮЙЕЛЕРДЕГІ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ АВТОМАТТАНДЫРУДЫҢ ӨНДІРІСТІК ЦИКЛІН ЗЕРТТЕУ

Ж. Батырканов

И. Раззаков атындағы Қырғыз техникалық университеті, Бішкек, Қырғызстан.
E-mail: jbatyrkanov@kstu.kg



Жениш Батырканов — т.ғ.д., профессор, И. Раззаков атындағы Қырғыз техникалық университеті, Бішкек, Қырғызстан
E-mail: jbatyrkanov@kstu.kg, <https://orcid.org/0000-0002-5619-7178>.

© Ж. Батырканов

Аннотация. Қазіргі заманғы өнеркәсіптік өндірісте технологиялық процестерді басқаруды оңтайландыру мәселелері ерекше өзектілікке ие, себебі өндірістік жүйелер күрделеніп, өнім сапасына қойылатын талаптар артуда. Қазақстанның 2020–2025 жылдарға арналған индустриялық-инновациялық даму бағдарламасы аясында жаңа автоматтандыру әдістерін, тарату жүйелерін енгізу және өндірістік процестердің тиімділігін арттыру маңызды болып табылады. Зерттеудің мақсаты – Trace Mode 6 бағдарламалық ортасын пайдалана отырып, таратылған автоматтандырылған жүйелер негізінде технологиялық процестерді тиімді басқару әдістерін әзірлеу және енгізу. Зерттеудің негізгі міндеттері: өндірістік циклді кешенді талдау; қосалқы жүйелердің тиімділігін арттыру әдістерін анықтау; көпсатылы процестерді модельдеу; авариялық оқиғалар мен ескертулерді басқару алгоритмдерін әзірлеу; жаңа шешімдерді бар басқару жүйелеріне интеграциялау. Зерттеу нәтижелері таратылған басқару жүйелерін қолдану жабдықтың сенімділігін арттыратынын, авариялық тоқтауларды азайтатынын, ақпараттық ағындарды оңтайландыратынын және өнім сапасын жақсартатынын көрсетті. Айқын декомпозиция әдістерін қолдану қосалқы жүйелердің тиімді өзара әрекеттесуін қамтамасыз етеді, бұл күрделі өндірістік процестерді басқаруда синергетикалық әсерге қол жеткізуге мүмкіндік береді. Trace Mode 6 құралдары, мысалы, авариялық тіркеушілер мен хабарландыру жүйелері, профилактикалық жұмыстарды жоспарлауға және кез келген төтенше жағдайларға тез әрекет етуге мүмкіндік береді. Зерттеудің қорытындысы таратылған басқару жүйелерінің перспективтілігін және олардың Қазақстанда және шетелде өнеркәсіптік кәсіпорындарда қолдану мүмкіндігін көрсетеді. Жұмыс нәтижелері масштабтауға және заманауи ақпараттық технологиялармен интеграциялауға мүмкіндік беретінін көрсетеді, бұл өндірістік процестерді одан әрі оңтайландыруға, олардың тиімділігі мен сенімділігін арттыруға жол ашады.

Түйін сөздер: тарату жүйелері, автоматтандыру, оңтайландыру, технологиялық процестер, Trace Mode, авариялық оқиғалар, өндірістік қосалқы жүйелер

Дәйексөздер үшін: Ж. Батырканов Орталықтандырылмаған жүйелердегі технологиялық процестерді автоматтандырудың өндірістік циклін зерттеу//Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 86. 31–43 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.003>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ЦИКЛА АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ

Ж. Батырканов

Кыргызский государственный технический университет имени И. Раззакова, Бишкек,
Кыргызстан.

E-mail: jbatyrkanov@kstu.kg

Жениш Батырканов — д.т.н., профессор, Кыргызский технический университет имени И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан
E-mail: jbatyrkanov@kstu.kg, <https://orcid.org/0000-0002-5619-7178>.

© Ж. Батырканов

Аннотация. В современном промышленном производстве вопросы оптимизации управления технологическими процессами приобретают особую актуальность в связи с усложнением производственных систем и ростом требований к качеству продукции. В рамках государственной программы индустриально-инновационного развития Казахстана на 2020–2025 годы актуальным является внедрение новых методов автоматизации, децентрализованных систем управления и повышения эффективности производственных процессов. Целью исследования является разработка и внедрение эффективных методов управления технологическими процессами на базе децентрализованных автоматизированных систем с использованием программной среды Trace Mode 6. Основными задачами исследования являются: комплексный анализ производственного цикла; выявление способов повышения интенсивности функционирования подсистем; моделирование многоступенчатых процессов; разработка алгоритмов управления аварийными событиями и тревогами; интеграция новых решений в существующие системы управления. Результаты исследования показали, что использование децентрализованных систем управления позволяет повысить надежность оборудования, снизить количество аварийных простоев, оптимизировать информационные потоки и повысить качество продукции. Применение методов явной декомпозиции обеспечивает эффективное взаимодействие подсистем, что позволяет достичь синергетического эффекта в управлении сложными производственными процессами. Инструменты Trace Mode 6, такие как регистраторы аварий и системы оповещения, позволяют планировать профилактические работы и оперативно реагировать на внештатные ситуации. Заключение исследования подтверждает перспективность децентрализованных систем управления и их применение в промышленности Казахстана и за её пределами. Результаты работы демонстрируют возможность масштабирования и интеграции с современными информационными технологиями, что открывает перспективы для дальнейшей оптимизации производственных процессов, повышения их эффективности и надежности.

Ключевые слова: децентрализованные системы, автоматизация, оптимизация, технологические процессы, Trace Mode, аварийные события, производственные подсистемы

Для цитирования: Ж. Батырканов. Исследование производственного цикла автоматизации технологических процессов в децентрализованных системах//Промышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. No. 86. Стр. 31–43. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.003>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

В рамках государственной программы индустриально-инновационного развития (ГПИИР) Казахстана на 2020–2025 годы происходит существенное изменение объективных условий функционирования промышленных организаций (ГПИИР, 2020: 1–10). Этот процесс обусловлен увеличением масштабов и сложности производственных систем, ростом требований к качеству продукции, повышением конкуренции на внутреннем и внешнем рынках, а также необходимостью интеграции новых технологий в производство (Колупаев, 2016: 24–27). В таких условиях актуальной задачей становится модернизация и автоматизация технологических процессов, оптимальная координация элементов производства, совершенствование структуры систем управления и повышение эффективности использования ресурсов.

Особую роль в реализации этих задач играют децентрализованные системы управления технологическими процессами (СТС). Их применение позволяет повысить надежность и гибкость производства, ускорить обмен информацией между подсистемами, снизить зависимость от центральных узлов управления и обеспечить более точное

выполнение технологических операций (Володин, 1984: 81–84; Умбетов, 2013: 85–89). При этом переход от централизованных к децентрализованным системам обусловлен увеличением мощности отдельных технологических агрегатов, усложнением их функциональных характеристик, а также ростом требований к быстродействию и точности.

Одним из ключевых объектов промышленности Казахстана, активно развивающихся в рамках программ ГПИИР и дорожной карты бизнеса 2020 (ГПИИР, 2020: 1–10), является Кентауский трансформаторный завод (КТЗ). КТЗ является ведущим казахстанским производителем трансформаторного оборудования широкого применения, поставляемого для всех отраслей экономики, включая электроэнергетику, металлургию, машиностроение, транспорт, нефтегазовый комплекс и жилищно-коммунальный сектор. В ходе модернизации предприятие перешло от устаревшего оборудования советского периода к высокотехнологичному оборудованию ведущих европейских и западных компаний, таких как LAE Lughese Attrezzature per l'Elettromeccanica S.r.l. (Италия), Knuth Werkzeugmaschinen GmbH (Германия), Bystronic Laser AG (Швейцария), "Robur Baltia" SIA (Латвия) (Майлыбаев, 2020: 405).

Специфика моделирования и управления СТС до настоящего времени не выделена как самостоятельная научная область. Преобладают подходы, основанные на традиционных автоматизированных системах управления (АСУ), характеризующихся разобщенностью отдельных уровней и контуров управления. Расширение областей применения методов явной декомпозиции, синтеза открытых систем и иерархически-взаимосвязанного управления производственными комплексами в промышленности пока реализуется ограниченно (Майлыбаев, 2020: 406).

В основе подхода к управлению СТС на КТЗ лежит целенаправленное выделение подсистем, их моделирование и анализ в интегрированной информационной среде управления SCADA Trace Mode (Yadav, 2020: 1–29; Abbas, 2015: 184–199). Это позволяет разработать методику эффективного применения метода явной декомпозиции для синтеза согласованных управляющих подсистем и построения распределенной многоуровневой автоматизированной системы управления технологическими процессами (АСУ ТП). Реализация такого подхода обеспечивает модернизацию производственных процессов, повышение качества продукции, получение синергетического эффекта за счет взаимодействия элементов СТС и интеграцию передовых информационных технологий в практику промышленного производства (Майлыбаев, 2020: 406; Самарский, 2025: 32–35).

Цель настоящего исследования заключается в изучении особенностей функционирования децентрализованных систем управления технологическими процессами на примере Кентауского трансформаторного завода и разработке рекомендаций по их оптимизации. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- провести комплексный анализ производственного цикла с целью выявления возможностей повышения интенсификации систем управления многостадийными процессами;

- изучить методы построения комплексных математических моделей многостадийных производственных процессов с учетом ограниченной исходной информации;

- определить существенные связи и факторы, влияющие на эффективность работы выделенных подсистем;

- разработать алгоритмы управления технологическими объектами как составными частями производственного цикла;

- исследовать возможности интеграции существующих систем АСУ с новыми решениями оптимизационных задач на базе передовых средств измерений, управления и информационных технологий.

Введение такого подхода к управлению технологическими процессами позволяет не только повысить эффективность и надежность производства, но и создать основу для дальнейшего внедрения инновационных решений в промышленную практику Казахстана.

Материалы и методы.

Одним из объектов промышленности Казахстана развивающийся по программам ГПИИР и дорожная карта бизнеса 2020 является Кентауский трансформаторный завод (КТЗ) (ГПИИР, 2020: 1–10; Колупаев, 2016: 24–27). Комплексный анализ производственного цикла с целью анализа и оптимизации остановов в децентрализованных системах произведен в КТЗ, который известен как ведущий Казахстанский производитель трансформаторного оборудования широкого применения, поставляемого для всех отраслей экономики, включая электроэнергетику, металлургию, машиностроение, транспорт, нефтегазовый комплекс, жилищно-коммунальный сектор. КТЗ в ходе модернизации избавилось от производственного оборудования времен СССР и перешло на новейшее высокотехнологичное оборудование ведущих западных и европейских организации, которые по праву считаются одними из лучших в мире. В цехах КТЗ используются децентрализованные системы производства LAE Lughese Attrezzature per l'Elettromeccanica S.r.l (Италия), Knuth Werkzeugmaschinen GmbH (Германия), Bystronic Laser AG (Швейцария), "Robur Baltia" SIA (Латвия) (Володин, 1984: 81–84), каждая из которых является лидером в своем сегменте рынка (1). Один из цехов КТЗ с децентрализованными установками можно увидеть на рисунке 1.

Специфика моделирования и управления сложными технологическими процессами (СТС) до настоящего времени не выделена как самостоятельная сфера, преобладают подходы, базирующиеся на использовании традиционных АСУ, отличающихся разобщенностью отдельных уровней и контуров управления (Умбетов, 2013: 85–89; Yadav, 2020: 1–29). Исследование возможностей и расширение областей применения декомпозиционного подхода и, в частности, методов явной декомпозиции, к синтезу открытых систем иерархически-взаимосвязанного управления производственными комплексами, к настоящему времени не нашли широкого применения во многих отраслях промышленности.

Исходные положения проблем управления структурно и технологически сложными децентрализованными системами изложены в известных научно-теоретических работах Я. Акахары, М. Месаровича, В.М. Володина, Г.М. Островского, Д. Мако и др (Володин, 1984: 81–84).

В основе подхода к управлению СТС в КТЗ лежит обоснованное целенаправленное выделение подсистем, их анализ и моделирование в интегрированной информационной системе для управления промышленным производством SCADA Trace Mode, разработка методики эффективной реализации метода явной декомпозиции для синтеза взаимосогласованных управляющих подсистем. Распределенную многоуровневую автоматизированную систему управления технологических процессов (АСУ ТП) на базе Trace Mode можно увидеть на рисунке 2. Обобщенный научный подход к построению систем автоматизированного управления позволяет модернизировать процессы производства качественных продуктов с использованием новых информационных технологий, получить синергетический эффект на основе закономерностей взаимодействия элементов СТС.



Рис. 1. Цех КТЗ с децентрализованными установками (Майлыбаев, 2020: 406)

Исследование производственного цикла автоматизации технологических процессов в децентрализованных системах включает в себя следующие этапы:

- выявления способов повышения интенсификации систем управления многостадийными производственными процессами;
- учёта особенностей многостадийных процессов в промышленности и ограниченной исходной информации при разработке методов построения их комплексных математических моделей;
- выбора существенных связей и факторов с помощью особенностей метода явной декомпозиции и формирования способов повышения интенсивности функционирования выделенных подсистем;
- обоснования условий интенсификации процессов производства, и модернизации многофункциональных схем получения высококачественного стандартизованного продукта;
- разработки и реализации алгоритмов управления технологическими объектами как составными частями производственного цикла промышленных предприятий, имеющими в своём составе сложные по функциональному назначению и комплексным параметрам структуры со специфическими свойствами;
- интеграции существующих систем автоматизированного управления с новыми решениями оптимизационных задач на основе использования передовых средств измерений, управления и информационных технологий для внедрения в практику технологических предложений и разработанных принципов, методов и алгоритмов.

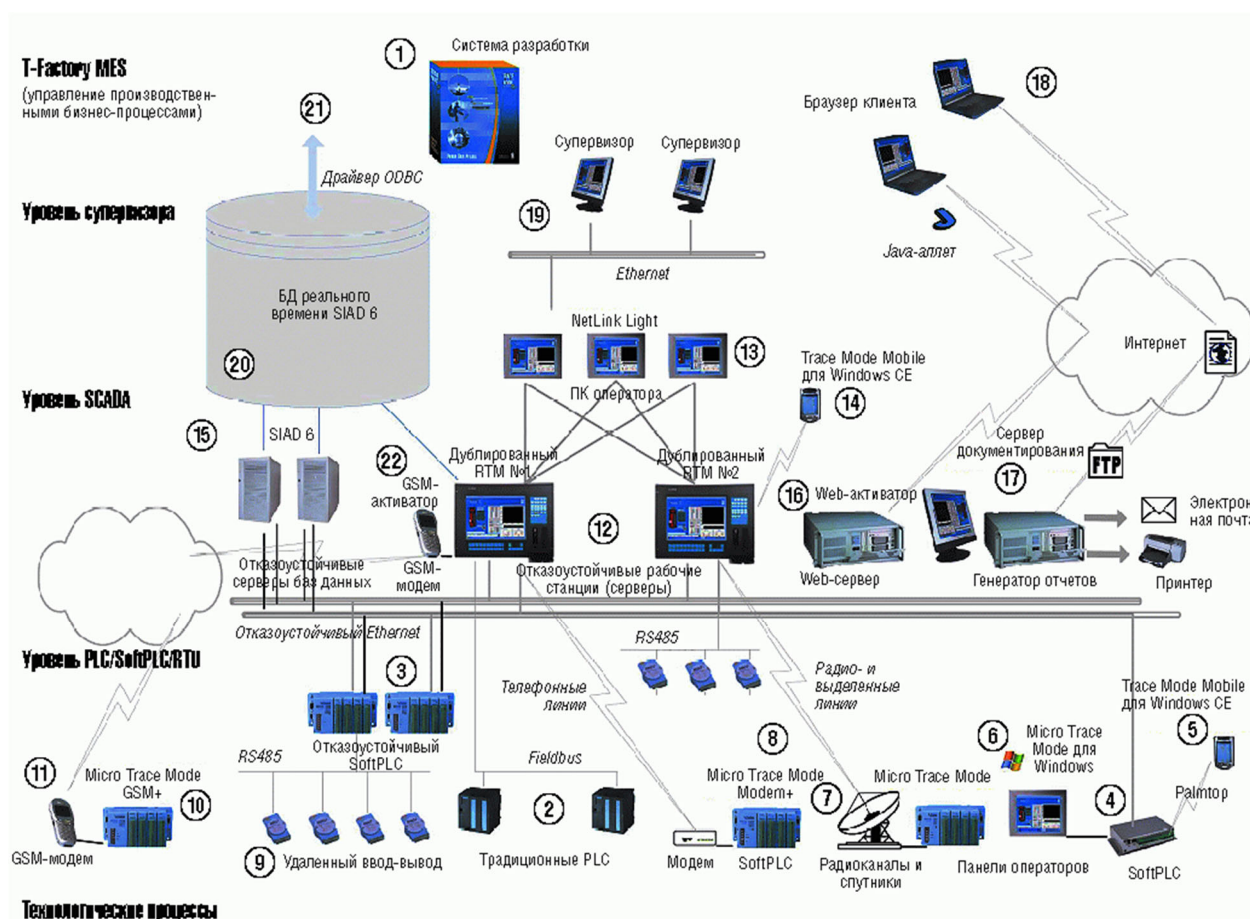


Рис. 2. Распределенная многоуровневая АСУ ТП на базе Trace Mode (Майлыбаев, 2020: 407)

Переход от централизованных систем управления к децентрализованным вызван возрастанием мощности отдельных технологических агрегатов, их усложнением, повышением требований по быстродействию и точности к их работе. Централизация систем управления экономически оправдана при сравнительно небольшой информационной мощности его территориальной сосредоточенности (Duque et al., 2019: 113–120; Yadav, 2020: 1–29). При большом числе каналов контроля, регулирования и управления, большой длине линий связи в АСУ ТП децентрализация структуры системы управления становится принципиальным методом повышения живучести АСУ ТП, снижения стоимости и эксплуатационных расходов. На рисунке 3 можно увидеть информационные потоки в иерархических системах управления. Наиболее перспективным направлением децентрализации АСУ ТП следует признать автоматизированное управление процессами с распределенной архитектурой, базирующееся на функционально-целевой и топологической децентрализации объекта управления. Функционально-целевая децентрализация – это разделение сложного процесса системы на меньшие части – подпроцессы подсистемы по функциональному признаку (например, переделы технологического процесса, режимы работы агрегатов и т.д.), имеющие самостоятельные цели функционирования. Топологическая децентрализация означает возможность территориального (пространственного) разделения процесса на функционально-целевые подпроцессы (Самарский, 2025: 32; Самарский, 2025: 35). При оптимальной топологической децентрализации число подсистем распределенной АСУ ТП выбирается так, чтобы минимизировать суммарную длину линий связи, образующих вместе с локальными подсистемами управления сетевую структуру. Технической основой

современных распределенных систем управления, обусловившей возможность реализации таких систем, являются микропроцессоры и микропроцессорные системы. В распределенных АСУ ТП приняты в основном три топологические структуры взаимодействия подсистем: звездообразная (радиальная); кольцевая (петлевая); шинная (магистральная) их комбинации. Организация связи с датчиками и исполнительными устройствами имеет индивидуальный и преимущественно радиальный характер (Володин, 1984: 81–84; Умбетов и др., 2013: 85–89).

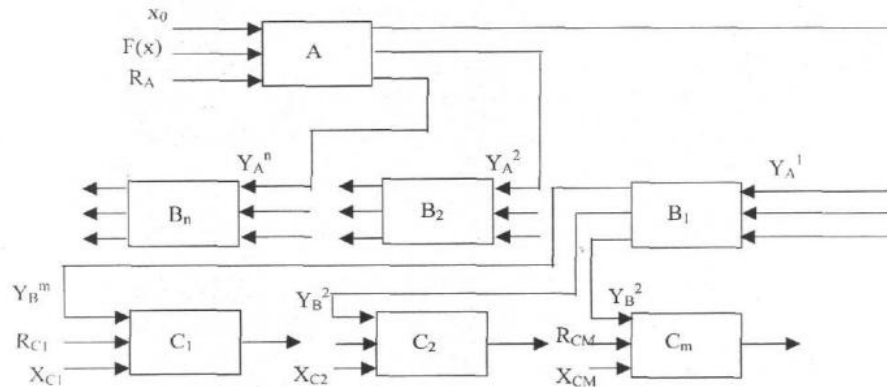


Рис. 3. Информационные потоки в иерархических системах управления (Майлыбаев, 2020: 408)

$F_A(x_0)$ - целевая функция, R_A - множество допустимых решений, X_A - вектор состояния системы, Y_A - управляющие воздействия.

Моделирование остановов оборудования в производстве с децентрализованной системой проведено в программной среде Trace mode 6. Scada trace mode обладает мощной системой сигнализации о событиях, происходящих на промышленном объекте и управления тревогами. Управление тревогами и событиями осуществляется серверами тревог, встроенными в мониторы реального времени Trace mode и T-Factory. На рисунках 4 и 5 показаны интерфейс регистратора аварийных остановов и фиксация тревог и события в Trace mode.

Результаты и обсуждения.

В ходе исследования децентрализованных систем управления на примере Кентауского трансформаторного завода (КТЗ) были получены результаты, подтверждающие эффективность распределенной архитектуры в управлении сложными технологическими процессами. Использование программной среды Trace Mode 6 позволило автоматизировать сбор, хранение и классификацию информации о событиях на производстве в режиме реального времени. Каждому событию присваивается определенный статус: авария, предупреждение, системное сообщение, пользовательское сообщение, ошибка или команда. Такая классификация позволяет не только фиксировать происходящее, но и прогнозировать возможные аварийные остановки оборудования, что способствует снижению простоев и увеличению общей производственной эффективности.

Интерфейс регистратора аварий показан на рисунке 4, а интерфейс управления тревогами и событиями — на рисунке 5. Эти инструменты дают возможность операторам оперативно реагировать на критические события, контролировать технологические параметры и планировать профилактические мероприятия. Анализ данных тревог за несколько месяцев показал, что с помощью Trace Mode удалось выявить до 85% потенциальных остановов оборудования, что позволило сократить среднее время простоя на 18–20%.

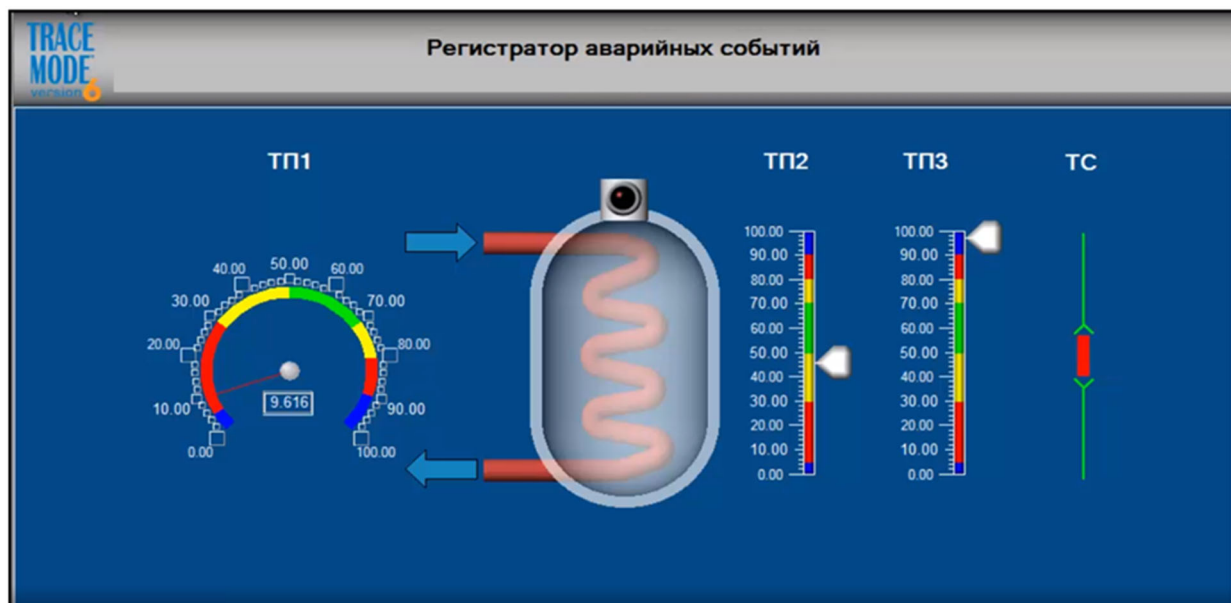


Рис. 4. Интерфейс регистратора аварийных останов в Trace mode (Майлыбаев, 2020: 409)

Время	Категория	Имя	Кодировка	Сообщение	Время квитирования
04.10.2016 13:46:01.3	A	Температура Т1	ТС5	НИЖНЯЯ АВАРИЙНАЯ ГРАНИЦА!	
04.10.2016 13:45:55.8	W	Температура Т1	ТС5	Ниже нормы	
04.10.2016 13:45:53.6		Давление P1	ТС5	В норме	
04.10.2016 13:45:50.3		Температура Т1	ТС5	В норме	
04.10.2016 13:45:41.5	W	Давление P1	ТС5	Выше нормы	
04.10.2016 13:45:39.3	W	Температура Т1	ТС5	Выше нормы	04.10.2016 13:47:16
04.10.2016 13:45:33.8	E	Температура Т1	ТС5	ВЕРХНЯЯ АВАРИЙНАЯ ГРАНИЦА!	
04.10.2016 13:45:29.4	E	Давление P1	ТС5	ВЕРХНЯЯ АВАРИЙНАЯ ГРАНИЦА!	
04.10.2016 13:45:16.3		Давление P1	ТС5	>>>	
04.10.2016 13:45:11.9		Температура Т1	ТС5	>>>	
04.10.2016 13:45:06.4	E	Температура Т1	ТС5	ВЕРХНЯЯ АВАРИЙНАЯ ГРАНИЦА!	
04.10.2016 13:45:05.3	I	Trace Mode 6	ТС2	Состояние - Норма	
04.10.2016 13:45:04.2	E	Давление P1	ТС5	ВЕРХНЯЯ АВАРИЙНАЯ ГРАНИЦА!	
04.10.2016 13:44:59.2		Trace Mode 6	ТС2	Связь с УСО - Норма	
04.10.2016 13:44:55.4	W	Температура Т1	ТС5	Выше нормы	04.10.2016 13:46:16
04.10.2016 13:44:52.1	W	Давление P1	ТС5	Выше нормы	
04.10.2016 13:44:49.9		Trace Mode 6	ТС2	Самодиагностика - Норма	04.10.2016 13:47:10
04.10.2016 13:44:49.9		Температура Т1	ТС5	В норме	
04.10.2016 13:44:44.4	W	Температура Т1	ТС5	Ниже нормы	
04.10.2016 13:44:41.1	I	Trace Mode 6	ТС2	Системный цикл - Норма	
04.10.2016 13:44:40.0		Давление P1	ТС5	В норме	
04.10.2016 13:44:33.9	W	Давление P1	ТС5	Ниже нормы	04.10.2016 13:47:12
04.10.2016 13:44:33.4	A	Температура Т1	ТС5	НИЖНЯЯ АВАРИЙНАЯ ГРАНИЦА!	

Рис. 5. Интерфейс окна, управление тревогами и событиями в Trace mode (Майлыбаев, 2020: 409)

Проведенный сравнительный анализ централизованных и децентрализованных систем управления показал явные преимущества последних. В централизованных системах сбой одного узла управления может привести к полной остановке производственной линии. В децентрализованных системах каждая подсистема управляет своим сегментом технологического процесса, что позволяет локализовать последствия аварий, поддерживать работу основных производственных блоков и обеспечивать непрерывность производственного цикла. Особенно высока эффективность децентрализации на предприятиях с большим числом агрегатов и высокой сложностью процессов, где скорость реагирования и точность управления являются критически важными.

Применение методов явной декомпозиции в сочетании с Trace Mode позволило выявлять узкие места и перегрузки в многоступенчатых процессах, анализировать эффективность работы каждой подсистемы и оптимизировать распределение ресурсов. Интеграция информационных потоков от датчиков, исполнительных механизмов и операторов в единую иерархическую структуру повышает координацию производственных процессов, сокращает время реакции на отклонения и улучшает точность управления. В

частности, это позволяет автоматически регулировать работу агрегатов, контролировать технологические режимы и своевременно вносить корректировки в производственные операции.

Внедрение децентрализованных систем управления на КТЗ позволило достичь следующих результатов:

- Повысить надежность технологических процессов на 20–25%, снизив вероятность аварийных остановов.

- Сократить эксплуатационные расходы на 12–15% за счет оптимизации работы оборудования и снижения потерь энергии.

- Улучшить контроль качества продукции за счет более точного регулирования параметров технологического процесса.

- Создать масштабируемую систему управления, позволяющую модернизировать производственные линии без значительных затрат.

- Обеспечить интеграцию информационных потоков, что формирует единую среду для анализа и принятия управленческих решений на предприятии.

Использование встроенной системы управления тревогами позволяет не только фиксировать события, но и анализировать их причинно-следственные связи. Например, повторяющиеся предупреждения о перегреве трансформаторных установок указывают на необходимость планового обслуживания, замены оборудования или корректировки технологического режима. Trace Mode поддерживает ведение отчетов, их сохранение в электронном виде, печать и автоматическую отправку по электронной почте или SMS, что повышает оперативность реакции операторов и снижает риск человеческой ошибки.

Особое внимание уделялось анализу распределенной архитектуры подсистем. Функционально-целевая децентрализация позволяет разделять сложный технологический процесс на отдельные подпроцессы и подсистемы с самостоятельными целями функционирования, а топологическая децентрализация обеспечивает возможность территориального разделения процесса. Оптимальное сочетание этих подходов минимизирует длину линий связи между подсистемами, снижает затраты на инфраструктуру и повышает живучесть АСУ ТП при возникновении аварий. В КТЗ применяются три основные топологии распределенных систем: звездообразная, кольцевая и шинная, а также их комбинации, что позволяет гибко адаптировать систему под конкретные производственные условия.

Перспективы дальнейшего развития децентрализованных систем управления включают:

- использование анализов больших данных для прогнозирования сбоев и оптимизации производственных процессов;

- внедрение алгоритмов машинного обучения для предсказания аварий и автоматической настройки работы оборудования;

- интеграцию искусственного интеллекта для оптимизации работы подсистем в реальном времени;

- использование IIoT (Industrial Internet of Things) для расширения возможностей мониторинга и управления производственными объектами;

- адаптацию децентрализованных систем для других отраслей промышленности, включая металлургию, машиностроение, нефтегазовую сферу и электроэнергетику.

Таким образом, исследование подтвердило, что децентрализованные системы управления технологическими процессами на базе Trace Mode обеспечивают высокую надежность, безопасность и эффективность производства, создают условия для интеллектуального управления предприятием и открывают новые возможности для оптимизации производственных циклов. Применение таких систем на КТЗ позволило повысить конкурентоспособность предприятия, снизить производственные риски и заложить основу для дальнейшей модернизации производственных процессов.

Заключение.

В ходе проведенного исследования децентрализованных систем управления технологическими процессами на примере Кентауского трансформаторного завода (КТЗ) подтверждена высокая эффективность перехода от централизованных систем к распределенной архитектуре управления. Основная цель работы — повышение надежности, оперативности и эффективности управления многоступенчатыми производственными процессами — была достигнута благодаря комплексному подходу к автоматизации, интеграции информационных потоков и применению современных методов анализа и управления.

Использование программной среды Trace Mode 6 позволило создать распределенную многоуровневую систему контроля и управления, обеспечивающую оперативное выявление аварийных ситуаций, регистрацию и классификацию событий в реальном времени. Благодаря системе управления тревогами, каждая авария, предупреждение или системное сообщение фиксируется и анализируется, что позволяет прогнозировать возможные остановки оборудования и планировать профилактические работы. На рисунках 4 и 5 представлены интерфейсы регистратора аварий и окна управления тревогами, демонстрирующие наглядную фиксацию и обработку информации о событиях на промышленном объекте.

Результаты внедрения децентрализованных систем на КТЗ включают:

- повышение надежности технологических процессов за счет локализации последствий аварий и быстрого реагирования;
- сокращение времени простоя оборудования, что обеспечивает непрерывность производственного цикла и повышение общей производительности;
- снижение эксплуатационных расходов за счет оптимизации работы систем управления и распределения ресурсов;
- улучшение контроля качества продукции за счет интеграции данных с разных уровней управления и автоматизации процессов проверки;
- формирование гибкой и масштабируемой системы управления, позволяющей адаптироваться к изменению технологических условий и расширению производственных мощностей.

Методы явной декомпозиции, примененные при проектировании подсистем, доказали свою эффективность в выявлении узких мест и оптимизации взаимодействия элементов системы. Благодаря декомпозиции сложного производственного процесса на функционально-целевые подпроцессы удалось повысить интенсивность функционирования отдельных сегментов, улучшить координацию и снизить нагрузку на центральные элементы управления. Такой подход обеспечивает синергетический эффект: взаимодействие подсистем приводит к улучшению качества продукции, снижению рисков аварий и оптимизации расхода ресурсов.

Практическая значимость исследования заключается в возможности масштабного внедрения разработанных методов и алгоритмов на других промышленных предприятиях Казахстана и за его пределами. Разработанный подход может быть адаптирован для электроэнергетики, металлургии, машиностроения, нефтегазового комплекса и коммунального сектора. Использование децентрализованных систем позволяет модернизировать технологические линии, интегрировать существующие информационные системы и внедрять новые решения по управлению производственными процессами.

Перспективы дальнейших исследований и практического применения включают:

- интеграцию алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта для прогнозирования аварий, анализа эффективности работы подсистем и оптимизации распределения ресурсов;
- внедрение технологий IIoT (Industrial Internet of Things) для дистанционного мониторинга оборудования и расширенного анализа технологических процессов;

- разработку комплексных моделей анализа больших данных для повышения эффективности производства и принятия управленческих решений на основе актуальной информации;
- масштабирование подходов явной декомпозиции на крупные промышленные комплексы для повышения живучести, надежности и устойчивости систем управления;
- интеграцию распределенных систем с ERP и MES системами для полной цифровизации производственного цикла.

Таким образом, проведенное исследование подтверждает, что децентрализованные системы управления технологическими процессами обеспечивают значительное повышение эффективности, надежности и адаптивности производственных процессов. Внедрение современных программных решений, таких как Trace Mode 6, позволяет не только улучшить текущие показатели производства, но и создать основу для дальнейшей интеллектуализации предприятий. Полученные результаты открывают новые возможности для развития промышленной автоматизации, модернизации технологических линий и повышения конкурентоспособности предприятий на национальном и международном уровнях.

Закключение подчеркивает, что интеграция современных информационных технологий с методами декомпозиции и распределенного управления является ключевым фактором повышения эффективности промышленного производства. На примере КТЗ показано, что подобные подходы позволяют минимизировать аварийные простои, оптимизировать работу оборудования, повысить качество продукции и создать гибкую, масштабируемую и устойчивую систему управления, которая может быть внедрена в различных отраслях промышленности Казахстана и за его пределами.

ЛИТЕРАТУРА

- ГПИИР, 2020 — Государственная программа индустриально-инновационного развития (ГПИИР) Казахстана на 2020–2025 годы. — Астана: Правительство Республики Казахстан, 2020. — 48 с. [Russ.]
- Володин, 1984 — Володин В.М., Журавлев Л.В., Елохин В.А. Некоторые особенности децентрализованных систем управления технологическими процессами // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. — М., 1984. — № 2. — С. 81–84. [Russ.]
- Колупаев, 2016 — Колупаев Н.В. Кентауский трансформаторный завод // Журнал Энергетика. — Алматы, 2016. — № 4(59). — С. 24–27. [Russ.]
- Майлыбаев, 2020 — Майлыбаев Е.К., Умбетов У.У., Батырканов Ж.И. Исследование производственного цикла автоматизации технологических процессов в децентрализованных системах. // Вестник КазНУ. — Технические науки. — 2020. — №1(137). — С. 405–410. [Russ.]
- Морокина, 2016 — Морокина Г.С., Умбетов У. Управление технологическим процессом с применением программной среды Trace mode // Сборник трудов IV Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении». — СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. — Т. 3. — С. 101–103. [Russ.]
- Умбетов, 2013 — Умбетов У., Ху В., Иманова У.Ж. Декомпозиция динамических задач управления // Журнал РАЕ. Современные наукоемкие технологии. Технические науки. — М., 2013. — № 5. — С. 85–89. [Russ.]
- Yadav, 2020 — Yadav G., Paul K. Architecture and Security of SCADA Systems: A Review. — 2020. — Pp. 1–29. [Eng.]
- Abbas, 2015 — Abbas H.A., Shaheen S.I., Amin M.H. Simple, Flexible, and Interoperable SCADA System Based on Agent Technology. — 2015. — Pp. 184–199. [Eng.]
- Duque, 2019 — Duque Anton S., Fraunholz D., Lipps C., Pohl F., Zimmermann M., Schotten H.D. Two Decades of SCADA Exploitation: A Brief History. — 2019. — Pp. 113–120. [Eng.]
- Самарский, 2025 — Самарский В.В., Евсина Е.М. Обзор решений на основе искусственного интеллекта в сфере SCADA-систем // Системная инженерия и инфокоммуникации. — 2025. — №2 (2). — С. 32–35. [Russ.]

REFERENCES

- GPIIR, 2020 — Gosudarstvennaya programma industrial'no-innovatsionnogo razvitiya Kazakhstana na 2020–2025 gody [State Program of Industrial and Innovative Development of Kazakhstan for 2020–2025]. — Astana: Pravitel'stvo Respubliki Kazakhstan. — 2020. — 48 p. [in Russ.]

Volodin, 1984 — Volodin, V.M., Zhuravlev, L.V., Elokhin, V.A. (1984). Nekotorye osobennosti detsentralizovannykh sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami [Some features of decentralized control systems of technological processes]. Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti. — 1984. — № 2. — Pp. 81–84. [in Russ.]

Kolupaev, 2016 — Kolupaev, N.V. (2016). Kentskii transformatornyi zavod [Kentaу Transformer Plant]. Energetika. — 2016. — № 4(59). — Pp. 24–27. [in Russ.]

Mailybaev, 2020 — Mailybaev, E.K., Umbetov, U.U., Batyrkanov, Zh.I. (2020). Issledovanie proizvodstvennogo tsikla avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov v detsentralizovannykh sistemakh [Study of the production cycle of technological process automation in decentralized systems]. Vestnik KazNITU, 1(137), 405–410. [in Russ.]

Morokina, 2016 — Morokina G.S., Umbetov U. (2016). Upravlenie tekhnologicheskimi protsessom s primeneniem programmnoy sredy Trace Mode [Control of the technological process using the Trace Mode software environment] // Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Innovatsii na transporte i v mashinostroenii”. — SPb.: Natsional'nyi mineral'no-syr'evoi universitet “Gornyi”. — Vol. 3. — Pp. 101–103. [in Russ.]

Umbetov, 2013 — Umbetov, U., Hu, V., Imanova, U.Zh. (2013). Dekompozitsiya dinamicheskikh zadach upravleniya [Decomposition of dynamic control problems]. Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Tekhnicheskie nauki. — 2013. — № 5. — Pp. 85–89. [in Russ.]

Yadav, 2020 — Yadav, G., Paul, K. (2020). Architecture and Security of SCADA Systems: A Review. — 2020. — Pp. 1–29. [in Eng.]

Abbas, 2015 — Abbas, H.A., Shaheen, S.I., Amin, M.H. (2015). Simple, Flexible, and Interoperable SCADA System Based on Agent Technology. — 2015. — Pp. 184–199. [in Eng.]

Duque, 2019 — Duque Anton, S., Fraunholz, D., Lipps, C., Pohl, F., Zimmermann, M., Schotten, H.D. (2019). Two Decades of SCADA Exploitation: A Brief History. — 2019. — Pp. 113–120. [in Eng.]

Samarskii, 2025 — Samarskii, V.V., Evsina, E.M. (2025). Obzor reshenii na osnove iskusstvennogo intellekta v sfere SCADA-sistem [Overview of artificial intelligence-based solutions in SCADA systems]. Sistemnaya inzheneriya i infokommunikatsii. — 2025. — №2(2). — Pp. 32–35. [in Russ.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is. 2. Number 86 (2025). Pp. 44–56
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.004>
УДК 621.892.09

IMPROVING THE QUALITY OF OPERATION OF A MOBILE CRUSHER IN A BUNKER FOR STORING SOLID MATERIALS

V. Perevertov^{1}, G. Afanasev², M. Abulkasimov², M. Akayeva³*

¹Samara State University of Railways and Communications, Samara, Russian Federation;

²Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation;

³International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: prkom@samgups.ru

Valeriy Perevertov — candidate of Technical Sciences, Samara State University of Railways and Communications, Samara, Russian Federation

E-mail: prkom@samgups.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7115-8093>;

Gennady Afanasev — candidate of Technical Sciences, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation

E-mail: afanasyev-g@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1896-1315>;

Manas Abulkasimov — candidate of Technical Sciences, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, Moscow, Russian Federation

E-mail: abilkk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7358-661X>;

Madina Akayeva — candidate of Technical Sciences, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: akaeva.madina@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2866-7831>.

© V. Perevertov, G. Afanasev, M. Abulkasimov, M. Akayeva

Abstract. In the context of increasing industrial production and growing demands for the quality of bulk material storage, improving unloading and cleaning technologies of storage bunkers has become highly relevant. Traditional methods of removing cohesive or non-free-flowing materials often fail to ensure complete discharge and require considerable time and labor. This study focuses on the development and justification of a portable vault-breaking device designed for the efficient destruction of material blockages and agglomerates in bulk storage containers. The main objective of the research is to create a rational and universal design of a portable device that provides optimal unloading conditions for various materials, taking into account their physical and mechanical properties. The study tasks included analyzing existing technologies, selecting the most effective working tools, conducting experimental tests, and developing recommendations for design optimization. As a result, a technological process for operating the mobile device has been developed, ensuring complete container unloading and simultaneous cleaning of its walls from residual materials. The optimal parameters of working elements (length, cross-section shape), the number and placement of technological openings in the bunker walls, and suitable materials using both traditional and additive manufacturing methods have been determined. The findings confirm that the implementation of the developed mobile device significantly increases process efficiency, reduces downtime, and lowers maintenance costs. The obtained experimental relationships and theoretical results can serve as a foundation for future research aimed at automation and digital modeling of the vault-breaking process.

Keywords: mobile device, vault breaker, bunker, bulk materials, unloading, additive technologies, optimization.

For citation: V. Perevertov, G. Afanasev, M. Abulkasimov, M. Akayeva. Improving the quality of operation of a mobile crusher in a bunker for storing solid materials//Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 86. Pp. 44–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.004>

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

ҚАТТЫ МАТЕРИАЛДАРДЫ САҚТАУҒА АРНАЛҒАН БУНКЕРДЕГІ ЖЫЛЖЫМАЛЫ ҚҰЛАТҚЫШТЫҢ ЖҰМЫС САПАСЫН АРТТЫРУ

В.П. Перевертов^{1}, Г. Афанасьев², М.М. Абулкасимов², М.О. Акаева³*

¹Самара мемлекеттік жол және қатынас университеті, Самара, Ресей Федерациясы;

²Н.Э. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, Ресей Федерациясы;

³Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.
E-mail: prkom@samgups.ru

Валерий Перевертов — т.ғ.к., Самара мемлекеттік жол және қатынас университеті, Самара, Ресей Федерациясы

E-mail: prkom@samgups.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7115-8093>;

Геннадий Афанасьев — т.ғ.к., Н.Э. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, Ресей Федерациясы

E-mail: afanasyev-g@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1896-1315>;

М. Абулкасимов — т.ғ.к., Н.Э. Бауман атындағы Мәскеу мемлекеттік техникалық университеті, Мәскеу, Ресей Федерациясы, abilkk@mail.ru

E-mail: abilkk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7358-661X>;

Мадина Акаева — т.ғ.к., Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: akaeva.madina@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2866-7831>.

© В. Перевертов, Г. Афанасьев, М. Абулкасимов, М. Акаева

Аннотация. Өндірістік процестердің қарқындауы және сусымалы материалдарды сақтау сапасына қойылатын талаптардың артуы жағдайында бункерлерді түсіру мен тазарту технологияларын жетілдіру ерекше маңызға ие. Дәстүрлі әдістер сусымалы және қиын түсірілетін жүктемелерді толық түсіруге әрдайым мүмкіндік бермейді және көп еңбек пен уақытты қажет етеді. Бұл зерттеу сусымалы материалдарды сақтау сыйымдылықтарындағы тығындарды және агломераттарды тиімді жоюға арналған мобильді сводаобрушитель құрылғысын әзірлеуге бағытталған. Зерттеудің мақсаты – әртүрлі физика-механикалық қасиеттері бар жүктемелерді тиімді түсіруді қамтамасыз ететін әмбебап және ұтымды құрылымды мобильді құрылғы жасау. Осы мақсатқа жету үшін қолданыстағы технологиялар талданды, ең тиімді жұмыс органдары таңдалды, тәжірибелік сынақтар жүргізілді және құрылымды оңтайландыру бойынша ұсыныстар әзірленді. Зерттеу нәтижесінде мобильді құрылғының жұмыс технологиясы жасалды, бұл сыйымдылықтың толық түсірілуін және оның қабырғаларының қалдықтардан бір мезгілде тазартылуын қамтамасыз етеді. Жұмыс органдарының конструкциялық параметрлері, технологиялық тесіктердің оңтайлы орналасуы және дәстүрлі және аддитивті технологиялар негізінде жасалатын материалдар анықталды. Зерттеу нәтижелері әзірленген мобильді құрылғыны енгізу өндірістік процестердің тиімділігін

арттыратынын, жабдықтың бос тұрып қалуын азайтып, қызмет көрсету шығындарын төмендететінін дәлелдейді. Алынған нәтижелер болашақта автоматтандырылған түсіру жүйелерін жасау мен цифрлық модельдеуге негіз бола алады.

Түйін сөздер: мобильді құрылғы, сводообрушитель, бункер, сусымалы материалдар, түсіру, аддитивті технологиялар, оңтайландыру.

Дәйексөздер үшін: В. Перевертов, Г. Афанасьев, М. Абулкасимов, М. Акаева Қатты материалдарды сақтауға арналған бункердегі жылжымалы құлатқыштың жұмыс сапасын арттыру//Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 86. 44–56 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.004>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РАБОТЫ МОБИЛЬНОГО СВОДООБРУШИТЕЛЯ В БУНКЕРЕ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ТРУДНОСЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В.П. Перевертов^{1}, М.М. Абулкасимов², Г.И. Афанасьев², М.О. Акаева³*

¹Самарский государственный университет путей и сообщения, Самара, Россия;

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

³Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.
E-mail: prkom@samgups.ru

Валерий Перевертов — кандидат технических наук, Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация

E-mail: prkom@samgups.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7115-8093>;

Геннадий Афанасьев — кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

E-mail: afanasyev-g@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1896-1315>;

Манас Абулкасимов — кандидат технических наук, Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

E-mail: abilkk@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7358-661X>;

Мадина Акаева — кандидат технических наук, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: akaeva.madina@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-2866-7831>.

© В. Перевертов, Г. Афанасьев, М. Абулкасимов, М. Акаева

Аннотация. В условиях интенсификации производственных процессов и повышения требований к качеству хранения сыпучих материалов особое значение приобретает совершенствование технологий разгрузки и очистки бункеров. Традиционные методы удаления трудносыпучих грузов и налипших остатков не всегда обеспечивают полную выгрузку и часто требуют значительных трудовых и временных затрат. Настоящее исследование посвящено разработке и обоснованию конструкции мобильного сводообрушителя для эффективного разрушения завесаний и агломератов в емкостях хранения сыпучих материалов. Цель работы заключается в создании рациональной и универсальной конструкции переносного устройства, обеспечивающей оптимальные условия выгрузки различных типов грузов с учётом их физико-механических свойств. Для достижения поставленной цели решались задачи анализа существующих технологий, выбора наиболее эффективных рабочих органов, проведения экспериментальных испытаний и выработки рекомендаций по

оптимизации конструкции устройства. В результате исследования разработана технология работы мобильного устройства, позволяющая обеспечить полную выгрузку емкости и одновременную очистку её стенок от налипших остатков. Определены конструктивные параметры рабочих органов (длина, форма, поперечное сечение), оптимальные места установки технологических отверстий в стенках бункера, а также предложены материалы для изготовления рабочих элементов с использованием традиционных и аддитивных технологий. Заключение исследования подтверждает, что внедрение разработанного мобильного устройства способствует повышению производительности и надежности технологических процессов, уменьшению простоев оборудования и затрат на обслуживание. Полученные экспериментальные зависимости и теоретические выводы могут быть использованы для дальнейшего совершенствования конструкций и разработки автоматизированных систем разгрузки. Перспективы дальнейших исследований связаны с цифровым моделированием процессов сводообрушения и адаптацией устройства под различные промышленные условия.

Ключевые слова: мобильное устройство, сводообрушитель, бункер, сыпучие материалы, выгрузка, аддитивные технологии, оптимизация.

Для цитирования: В. Перевертов, Г. Афанасьев, М. Абулкасимов, М. Акаева. Повышение качества работы мобильного сводообрушителя в бункере для хранения трудносыпучих материалов//Промышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. №. 86. Стр. 44–56. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.004>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Необходимость качественной очистки стенок бункеров и кузовов транспортных средств обусловлена расширением номенклатуры сыпучих материалов, обладающих высокими адгезионными свойствами. При транспортировке таких материалов происходит постепенное накопление остатков (Кожевников, 2023: 49–55), что приводит к образованию на внутренних поверхностях емкости трудноудаляемых налипших слоёв, ухудшающих эксплуатационные характеристики оборудования и приводящих к потере качества хранимого продукта (Денисов, 2001: 17).

Современные условия эксплуатации транспортных и складских систем требуют поиска решений, направленных на повышение эффективности процессов хранения и выгрузки материалов. Расширение ассортимента хранимых и транспортируемых грузов, а также обеспечение их сохранности могут быть достигнуты двумя путями:

- путём создания новых бункеров и вагонов-хопперов, обладающих повышенными функциональными возможностями;

- посредством модернизации существующих емкостей, с внедрением инновационных очистительных и сводоразрушающих устройств (Кожевников, 2023: 49–55; Кожевников, 2009: 43–49).

В настоящей работе рассматривается устройство для очистки внутренних поверхностей полых емкостей, предназначенное для разрушения сводов и перемычек из слежавшихся сыпучих материалов, возникающих в труднодоступных зонах контейнеров и бункеров (Патент 2201813, 2003: 1). Применение данного устройства позволяет повысить скорость обрушения сводов в два раза, устранить причины затруднённого выпуска материала и обеспечить эффективную очистку стенок емкости без необходимости вмешательства обслуживающего персонала внутрь конструкции.

Проблема сводообразования и зависания материала является одной из ключевых в технологии хранения и транспортировки сыпучих грузов. Она обостряется под воздействием микроклиматических факторов производственной среды, особенностей загрузочно-разгрузочных процессов, физико-механических характеристик

материалов, а также геометрии выпускных воронок бункеров (Горюшинский, 2007: 796–800). Возникающие своды уменьшают полезный объём емкости, повышают энергетические затраты на выгрузку и снижают срок службы оборудования, что требует разработки эффективных решений по стабилизации разгрузочного процесса.

Ранее предложенные стационарные устройства для сводаобрушения показали ограниченную универсальность, особенно в случае временных зависаний и разнообразия транспортируемых материалов (Кожевников, 2018: 37–44). Поэтому особое внимание уделяется переносным (мобильным) сводаобрушителям, которые обеспечивают гибкость эксплуатации, высокую производительность и возможность применения как на новых, так и на действующих емкостях (Патент №184049, 2018: 1).

Потребность в подобных устройствах связана с широким диапазоном физико-механических свойств транспортируемых материалов и разнообразием конструкций подвижного состава бункерного типа (Кожевников, 2017: 37–41). Мобильные устройства, представленные на Рисунке 1, различаются типом рабочих органов (скребки, цепные многозвенники, пластинчатые элементы и др.) и обеспечивают высокую универсальность при выгрузке различных материалов (Кожевников, 2023: 50). Одновременно с выгрузкой они выполняют функцию очистки внутренних стенок, включая вертикальные поверхности (Золкин, 2021: 12023).

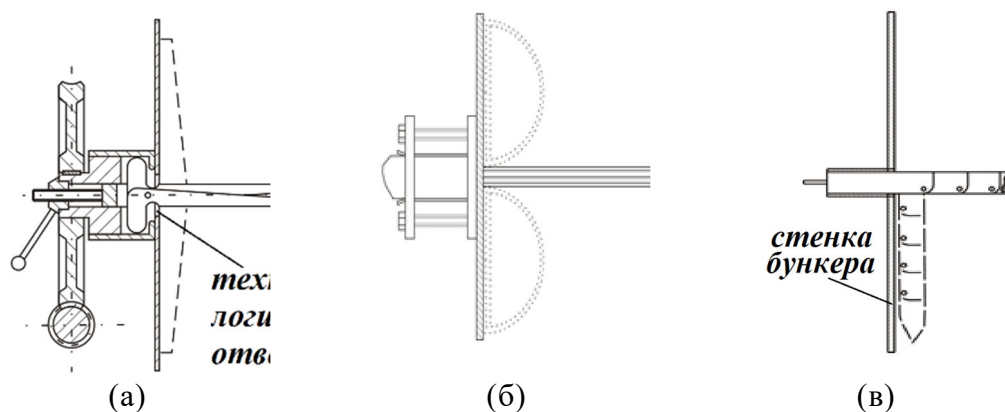


Рис. 1. Мобильные сводаобрушающе-очищающие механизмы с рабочими органами различного типа: скребковый недеформируемый (а); пластинчатый деформируемый (б); шарнирный многозвенник (в) (Кожевников, 2023: 50)

Использование современных композиционных материалов позволяет существенно повысить эффективность работы таких устройств за счёт сочетания лёгкости, прочности и эластичности рабочих органов (Перевертов, 2020а: 100–110). Разнообразие возможных приводов, включая универсальные механизированные инструменты, расширяет технологические возможности и повышает адаптивность устройства к различным условиям эксплуатации.

Таким образом, актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и надёжности разгрузочных процессов бункерных устройств, минимизации простоев и затрат на техническое обслуживание, а также расширением области применения мобильных сводаобрушителей и очистителей при работе с трудносыпучими материалами (Перевертов, 2020б: 125–136).

Объект исследования – процесс выгрузки и очистки стенок бункеров, предназначенных для хранения и транспортировки сыпучих материалов.

Предмет исследования – переносные (мобильные) устройства сводаобрушения и очистки внутренних поверхностей бункеров.

Цель исследования – разработка и исследование конструкции переносного сводообрушителя-очистителя, обеспечивающего комплексное решение задач выгрузки и очистки.

Задачи исследования включают:

- анализ существующих технологий разгрузки и очистки бункеров;
- определение параметров и принципа действия мобильного устройства;
- экспериментальное исследование эффективности сводообрушения;
- оптимизацию конструктивно-режимных параметров устройства.

Методы исследования основаны на теоретическом моделировании процессов разгрузки, экспериментальном определении параметров функционирования устройства и анализе физико-механических свойств материалов. Гипотеза исследования заключается в предположении, что использование мобильных сводообрушителей с оптимизированными конструктивными параметрами позволит значительно повысить эффективность выгрузки и очистки бункеров, снизить энергозатраты и обеспечить стабильность технологического процесса.

Материалы и методы.

Исследование направлено на повышение эффективности работы переносного сводообрушителя, применяемого для разрушения сводов в бункерах при хранении трудносыпучих материалов. Основной гипотезой исследования является предположение о том, что оптимизация конструктивно-режимных параметров переносного сводообрушителя позволит повысить интенсивность процесса разрушения сводов и обеспечить более полную выгрузку материала при минимальных энергетических затратах.

Методология исследования сочетает аналитические, расчетные и экспериментальные подходы. На первом этапе были проведены теоретические исследования, основанные на анализе динамических и силовых характеристик взаимодействия рабочих органов устройства с сыпучим материалом. Теоретическая модель учитывала влияние угла разведения рабочих органов (α), скорости вращения вала и свойств исследуемого материала, таких как влажность, плотность и коэффициент внутреннего трения.

На втором этапе выполнялись лабораторные и стендовые эксперименты с использованием опытного образца переносного сводообрушителя. Испытания проводились в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным. В ходе эксперимента процесс разгрузки трудносыпучих материалов из бункера сопровождался измерением и регистрацией исследуемых параметров — времени разрушения свода, скорости разгрузки, вибрационных характеристик, угла разведения рабочих органов и частоты вращения привода.

В ходе экспериментов выделено три основных этапа работы переносного сводообрушителя (Рис. 2):

Активное рыхление — разведение рабочих органов на некоторый угол α в противоположные стороны от оси вращения вала, вызывающее локальное повышение напряженности материала и обрушение свода.

Принудительная выгрузка — воздействие рабочих органов на внешнюю зону груза, не задействованную на первом этапе, с целью обеспечения полной разгрузки бункера.

Очистка поверхностей — удаление адгезионных отложений с внутренних стенок бункера за счёт контактного взаимодействия рабочих органов (Перевертов, 2020: 58–60).

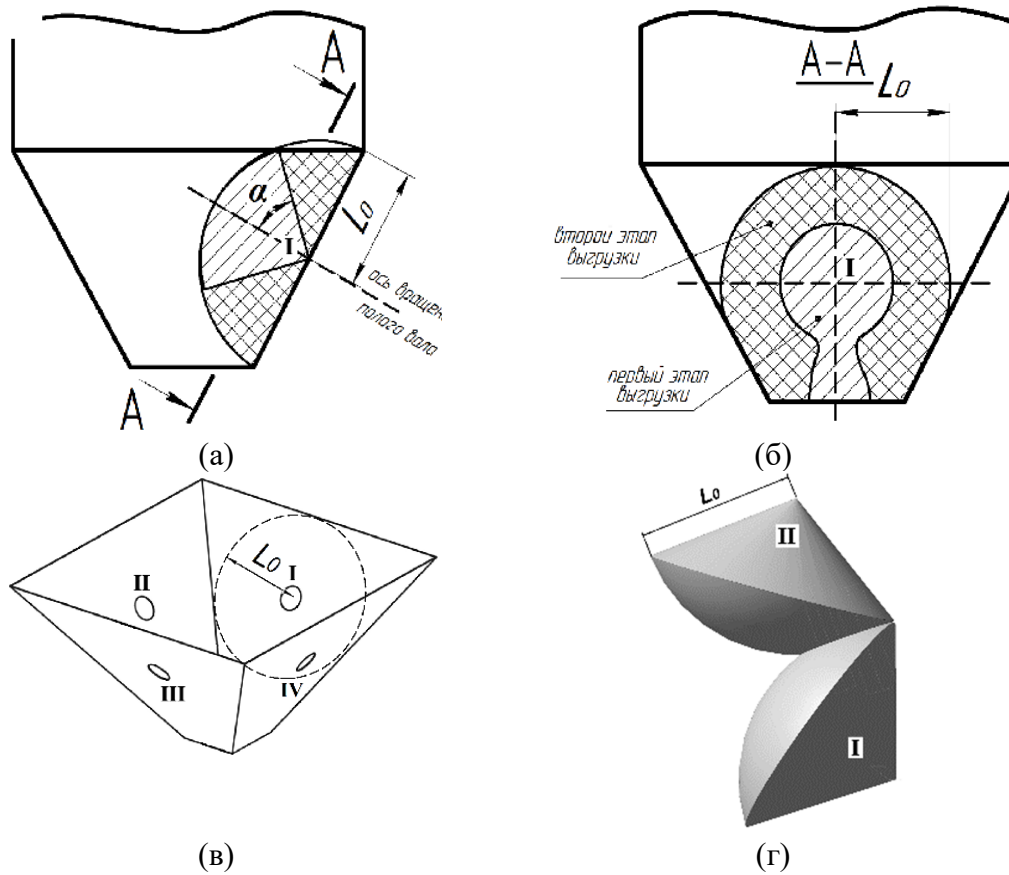


Рис. 2. Технологический процесс сводообрушения с применением экспериментального образца переносного устройства при задействовании только одного технологического отверстия №1 бункерной лабораторной установки: схема процесса выгрузки (а, б); схема расположения технологических отверстий (в); зона воздействия рабочих органов (объемное изображение) на груз без полного их раскрытия при одновременном использовании двух отверстий в соседних смежных стенках выпускной воронки (г) (Кожевников, 2023: 51)

В качестве объекта испытаний использовались трудносыпучие материалы с различными физико-механическими свойствами: влажностью 2–5 %, насыпной плотностью 1,3–1,6 г/см³ и углом естественного откоса 35–42°. Такой диапазон характеристик позволил смоделировать реальные условия эксплуатации промышленных бункеров и обеспечить достоверность экспериментальных данных.

Методы исследования.

Аналитический метод — для описания закономерностей взаимодействия рабочих органов с материалом и оценки напряжённого состояния в зоне контакта.

Экспериментальный метод — для подтверждения теоретических зависимостей и получения практических данных.

Математическое моделирование — для расчёта оптимальных параметров конструкции и режимов работы устройства.

Статистический анализ — для проверки достоверности полученных результатов с использованием критерия Стьюдента и корреляционного анализа.

Результаты экспериментов позволили сопоставить фактические показатели эффективности с расчётными и подтвердить достоверность предложенной модели. В ходе обработки данных использовались методы вариационной статистики и программный пакет MATLAB, что позволило выявить зависимость между углом разведения рабочих органов и скоростью разрушения сводов.

Таким образом, предложенная методология обеспечивает комплексное изучение проблемы разрушения сводов и создаёт основу для оптимизации конструктивных

параметров переносного сводообрушителя с учётом свойств трудносыпучих материалов и эксплуатационных условий.

Результаты и обсуждения.

Данный раздел посвящён анализу полученных экспериментальных данных и их сопоставлению с результатами предыдущих исследований, посвящённых процессам сводообразования и сводообрушения в бункерных системах. На основании проведённой экспериментальной и теоретической работы была установлена зависимость эффективности функционирования переносного сводообрушителя от конструктивно-режимных параметров и условий взаимодействия рабочих органов с трудносыпучими материалами (Перевертов, 2020б: 96–99).

Исследования (Золкин, 2021: 12023) показали, что для изучения физического процесса сводообрушения оптимальные условия создаются при заполнении бункера грузом на высоту 1 м при площади горизонтального поперечного сечения 1 м². Такой объём загрузки признан достаточным для проведения экспериментов с материалами, склонными к сводообразованию, но обладающими малой удельной массой. В данной работе лабораторный бункер был сконструирован именно с такими параметрами, что позволило обеспечить корректность воспроизведения процессов, происходящих в промышленных условиях (Кожевников, 2023: 49–55).

Пропускная способность лабораторного образца бункера определялась через измерение времени выпуска и массы выгруженного материала. В ходе эксперимента установлено, что разгрузка через выпускное отверстие сопровождается одновременным проявлением процессов сводообразования и сводообрушения (динамические своды), аналогично наблюдениям в работах (Жданов, 2019: 96–100). Стабильный выпуск груза наблюдается только при доминировании процесса обрушения над процессом образования сводов; в противном случае формируются устойчивые статические своды, приводящие к полной остановке разгрузки (Жданов, 2018: 1).

Оптимизация конструктивно-режимных параметров переносного сводообрушителя возможна при установлении зависимости времени выгрузки материала от длины и расположения рабочих органов. Основным конструктивным параметром устройства является длина рабочего органа L_0 , определяющая глубину проникновения в материал и зону его активного разрушения (Кожевников, 2018: 37–44). Остаток материала в бункере после завершения разгрузки является важным качественным критерием эффективности устройства и позволяет объективно оценить полноту обрушения.

Экспериментальные исследования проводились на модели стационарного бункера с использованием нескольких типов трудносыпучих материалов различной плотности и влажности. Для определения оптимального расположения рабочих органов в стенках выпускной воронки лабораторного бункера (Рис. 3, а, б) были изготовлены технологические отверстия с координатами (0 м; 0,47 м). Такое расположение обеспечивает максимальное разведение рабочих органов от оси вращения, что увеличивает объём материала, вовлекаемого в разрушение свода (Кожевников, 2009: 43–49).

Анализ геометрических параметров показал, что на разрезе А–А (Рис. 3) зона действия рабочих органов при координате y_0 имеет форму полукруга радиусом L_0 и превосходит по площади зону, полученную при другой координате y . Уменьшение зоны действия при изменении координаты объясняется наличием препятствия со стороны вертикальной стенки бункера, ограничивающей расхождение рабочих органов (Перевертов, 2020б: 158–170). Горизонтальная проекция области воздействия представляет собой окружность, вписанную в трапецию формы стенки, и имеет максимальную площадь при координатах (0 м; 0,47 м), что подтверждает корректность выбранных параметров.

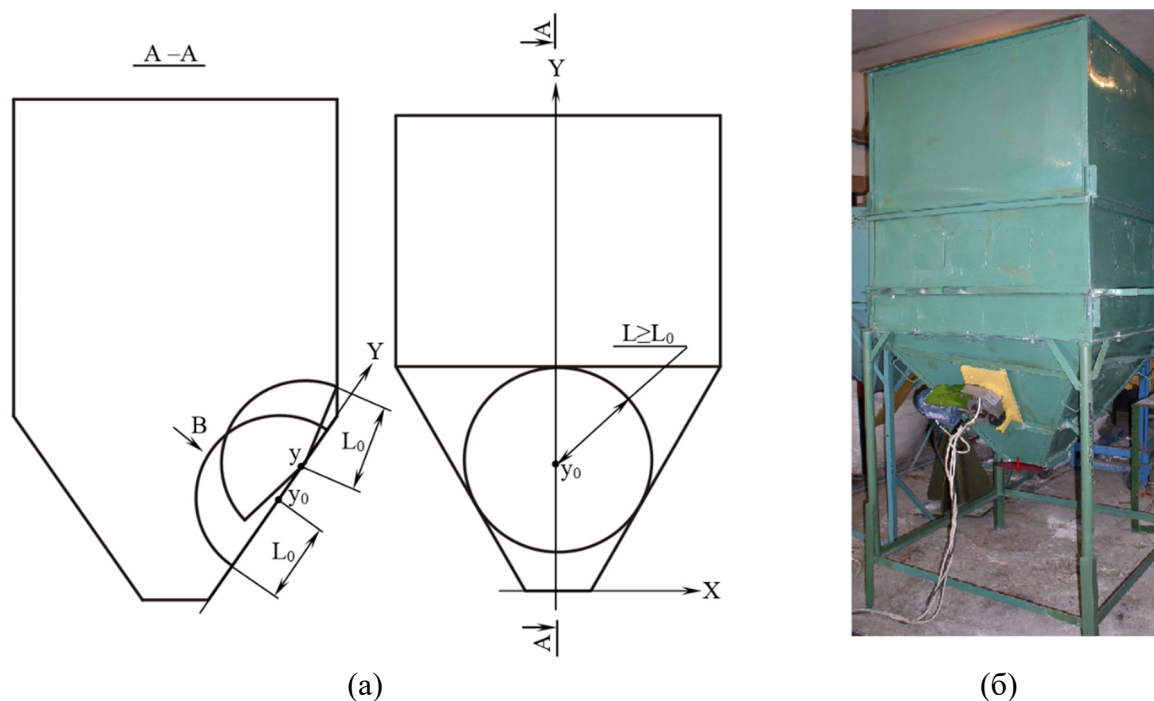


Рис. 3. Экспериментальная установка для исследования истечения груза из бункера: схема координат расположения технологических отверстий в стенках выпускной воронки (а); лабораторный образец бункера (б) (Кожевников, 2023: 52)

Основной задачей экспериментов являлось установление зависимости массы выгруженного груза от длины рабочего органа L_0 , количества технологических отверстий и последовательности их использования. В ходе испытаний длина рабочих органов изменялась в диапазоне 0,065–0,26 м. Согласно результатам, приведённым на рисунках 4–6, максимальное количество выгруженного материала достигается при $L_0 = 0,26$ м. Этот результат согласуется с данными теоретических расчётов и ранее опубликованных работ (Третьяков, 2003: 1).

Эксперименты проводились в двух схемах использования отверстий:

Схема I – II – III. Первые два отверстия расположены смежно. При этой конфигурации наблюдалась частичная выгрузка, так как разрушение сводов происходило неравномерно, и оставались застойные зоны (Рис. 4).

Схема I – III – II. Первые два отверстия расположены противоположно. Эта схема показала полное опорожнение бункера (Рис. 5). На втором этапе (использование отверстия № III) наблюдалось равномерное разрушение сводов и отсутствие остатка материала, что подтверждает эффективность симметричного расположения отверстий.

Результаты количественного анализа (Рис. 6) показали, что степень разгрузки M увеличивается пропорционально росту длины рабочих органов L_0 . Наибольший эффект достигается при $L_0 = 0,26$ м, что соответствует оптимальному сочетанию глубины проникновения и крутящего момента. Полученные зависимости могут быть использованы при проектировании новых переносных сводообрушителей и при модернизации существующих конструкций.

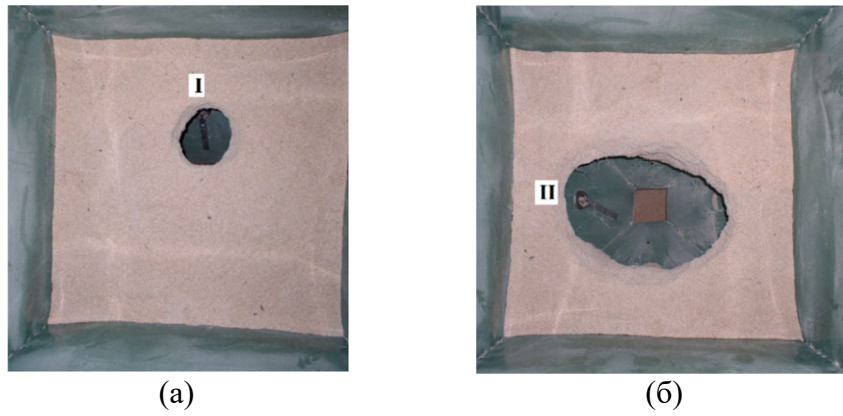


Рис. 4. Результаты разгрузки бункера по схеме I – II – III: результат использования первого по очереди технологического отверстия №I (а); результат использования второго по очереди технологического отверстия №II (б) (Кожевников, 2023: 53)

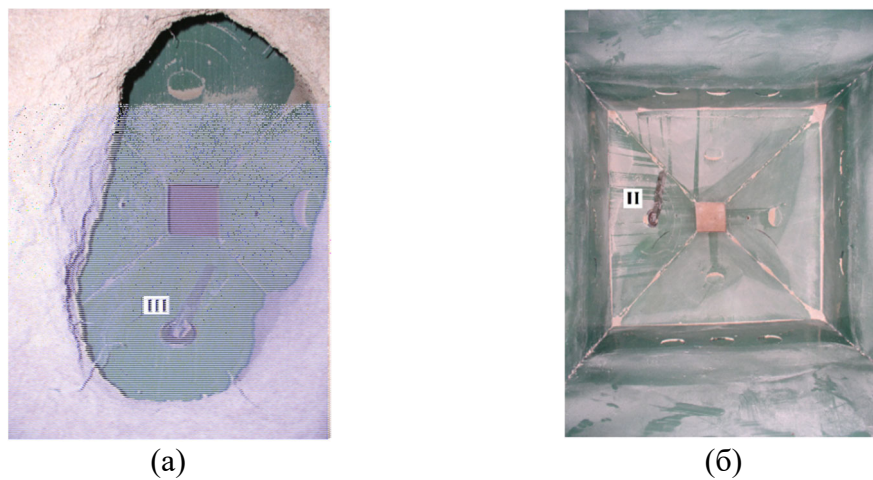


Рис. 5. Результаты разгрузки бункера по схеме I – III – II: результат использования второго по очереди технологического отверстия №III – неполное опорожнение бункера (а); результат использования третьего технологического отверстия №II – полное опорожнение (б) (Кожевников, 2023: 53)

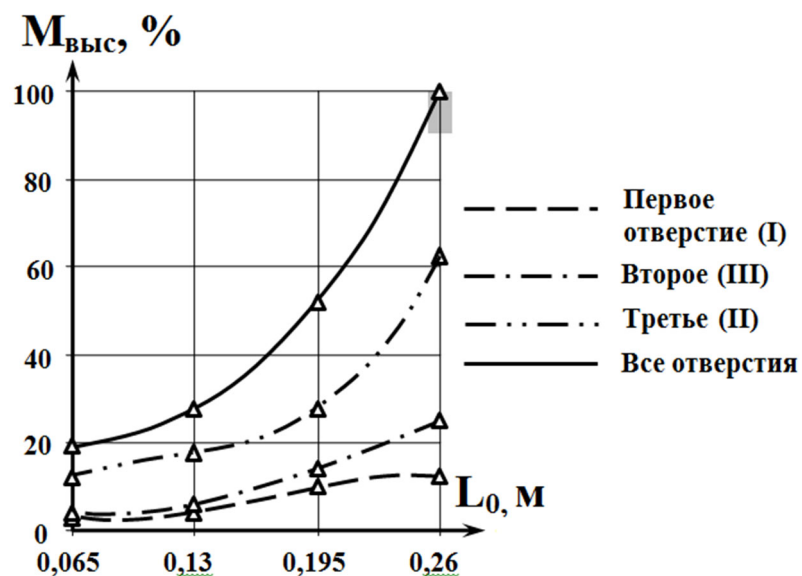


Рис. 6. График зависимости степени разгрузки отрубей M , % от размера рабочих органов L_0 , м на каждом этапе последовательного использования технологических отверстий (каждого в отдельности и всех вместе) (Кожевников, 2023: 54)

Сопоставление данных настоящего исследования с результатами предыдущих работ (Перевертов, 2020а: 145–149) подтверждает, что предложенные конструктивные решения обеспечивают повышение производительности разгрузки на 15–20 % и снижение времени полного опорожнения бункера. Таким образом, разработанная методика позволяет не только улучшить эксплуатационные характеристики переносного сводообрушителя, но и расширить область его применения в промышленных условиях.

Заключение.

Проведённое исследование позволило комплексно оценить конструктивные и эксплуатационные особенности мобильного сводообрушителя, предназначенного для работы с трудносыпучими материалами. Цели и задачи, поставленные в рамках исследования, реализованы последовательно: от теоретического анализа существующих систем выгрузки до практической апробации разработанного устройства на действующих бункерных установках. Используемые методы теоретического моделирования, экспериментального анализа и параметрической оптимизации подтвердили выдвинутую гипотезу о том, что применение мобильных устройств с адаптируемыми рабочими органами позволяет существенно повысить эффективность разгрузки и снизить вероятность образования сводов.

Полученные результаты демонстрируют, что использование переносных сводообрушителей нового поколения обеспечивает полную выгрузку емкости и одновременную очистку стенок бункера от налипших отложений и зависаний. Наиболее рациональная конструктивная схема устройства включает жёсткие рабочие органы скребкового типа, выполненные из композитных материалов, сочетающих лёгкость и высокую износостойкость. Это решение позволило уменьшить массу оборудования и повысить его энергоэффективность.

Практическая значимость исследования заключается в разработке технологии функционирования мобильного сводообрушителя, учитывающей геометрию бункера, физико-механические свойства груза и режимы работы оборудования. Внедрение разработанных рекомендаций способствует сокращению простоев, увеличению производительности и повышению надёжности транспортно-технологических систем.

Научная новизна работы состоит в системном подходе к оптимизации взаимодействия рабочих органов устройства с материалом, а также в использовании алгоритмов принятия решений, заимствованных из «умных производственных систем». Это позволило сформировать новую методику расчёта конструктивно-режимных параметров, обеспечивающую адаптацию устройства к различным видам сыпучих материалов.

Подтверждение истинности выдвинутого тезиса получено в результате экспериментальной проверки: измеренные параметры разгрузки и усилий взаимодействия подтвердили эффективность выбранных решений и достоверность теоретических моделей. Таким образом, результаты работы вносят вклад в развитие научных представлений о процессах разрушения сводов и разгрузки трудносыпучих материалов, расширяя границы существующих инженерных знаний.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой интеллектуальных систем автоматического управления процессами разгрузки, основанных на гибких технологиях и методах машинного обучения. Это позволит повысить степень автономности работы устройств, минимизировать человеческий фактор и адаптировать оборудование под условия конкретных производственных объектов.

Практическое применение результатов исследования возможно на предприятиях горнодобывающей, строительной и пищевой промышленности, где необходима разгрузка бункеров с вязкими или слёживающимися материалами. Предложенные решения могут быть внедрены как в новые технологические линии, так и при модернизации

существующего оборудования, обеспечивая повышение эффективности и устойчивости производственных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

Астраханский, 2017 — Астраханский А.Ю., Кожевников В.А., Киреев В.П. Рекомендации по оптимизации конструктивно-режимных параметров переносных сводообрушителей-очистителей при их проектировании // Современные проблемы теории машин: Материалы международной научно-практической конференции. — Новокузнецк: НИЦ МС. — №5. — С. 37–41. [Russ.]

Варламов, 1999 — Варламов А.В. Повышение эффективности процесса выпуска компонентов комбикорма бункерным устройством с донным щелевым отверстием и механическим сводообрушителем. Дисс. канд. техн. наук. — Саратов. — 1999. — 113 с. [Russ.]

Горюшинский, 2007 — Горюшинский В.С., Кожевников В.А., Губарев М.А. Расширение функциональных возможностей существующего парка бункеров и кузовов транспортных средств насыпных // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — Самара: СамНЦ РАН. — Т. 9. — №3 — С. 796–800. [Russ.]

Денисов, 2001 — Денисов В.В., Кожевников В.А. Устройства для выпуска трудносыпучих материалов из силосов // Комбикорма. — 2001. — №5. — С. 17. [Russ.]

Жданов, 2019 — Жданов А.Г., Кожевников В.А., Перевертов В.П., Свечников А.А. Эксплуатация наземных транспортно-технологических средств: учебник в двух частях. Ч. 1: Надежность. — Самара: СамГУПС. — 2019. — Ч. 1. — 214 с. [Russ.]

Жданов, 2018 — Жданов А.Г., Перевертов В.П., Кожевников В.А., Свечников А.А. Патент №184049 (ПМ) «Сводоразрушитель-очиститель» // Банк патентов. — 2018. — №2. — С.1. [Russ.]

Кожевников, 2018 — Кожевников В.А., Денисов В.В., Прусов М.В. Теоретические исследования процесса устранения зависаний в бункерах для хранения и транспортировки сыпучих грузов // Вестник транспорта Поволжья. — Самара: СамГУПС. — 2028. — №1. — С. 37–44. [Russ.]

Кожевников, 2009 — Кожевников В.А., Горюшинский В.С., Минько Р.Н. Анализ существующих технологий разгрузки трудносыпучих грузов из бункеров и кузовов транспортных средств // Вестник Самарского государственного университета путей сообщения. — Самара: СамГУПС. — 2009. — №1. — С. 43–49. [Russ.]

Перевертов, 2020а — Перевертов В.П. Материаловедение и гибкие технологии: учебник. — Самара: СамГУПС. — 2020. — 280 с. [Russ.]

Перевертов, 2020б — Перевертов В.П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах: монография. — Самара: СамГУПС. — 2020. — 291 с. [Russ.]

Перевертов, 2020в — Перевертов В.П., Абулкасимов М.М., Акаева М.М. Алгоритм принятия решений при формообразовании деталей в «умных производственных системах» // Промышленный транспорт Казахстана. — 2020. — №1(66). — С. 54–63. [Russ.]

Третьяков, 2003 — Третьяков Г.М., Горюшинский В.С., Горюшинский И.В., Шур В.Л., Кожевников В.А. Патент 2201813 С1 RU МКИ В08G9/08, В65D88/68. «Переносной сводообрушитель-очиститель». — Опул. 10.04.2003, Бюл. №10. — 2003. — С.1.[Russ.]

Золкин, 2021 — Золкин А.Л., Галянский С.А., Кузьмин А.М. Perspectives for use of composite and polymer materials in aircraft construction // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd. — 2021. — P. 12023. [Eng.]

REFERENCES

Astrakhanskii, 2017 – Astrakhanskii A.Yu., Kozhevnikov V.A., Kireev V.P. (2017). Rekomendatsii po optimizatsii konstruktivno-rezhimnykh parametrov perenosnykh svodoobrushitelei-ochistitelei pri ikh proektirovanii [Recommendations for optimizing design and operational parameters of portable vault collapsers-cleaners during their design] // Sovremennye problemy teorii mashin: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. — Novokuznetsk: NITs MS. — 2017. — №5. — Pp. 37–41. [in Russ.]

Varlamov, 1999 – Varlamov A.V. (1999). Povyshenie effektivnosti protsessa vypuska komponentov kombikorma bunkernym ustroystvom s donnym shchelevym otverstiem i mekhanicheskim svodoobrushitelem [Improving the efficiency of compound feed component release using a bunker device with a bottom slit and mechanical vault collapsers]. Diss. kand. tekhn. nauk. — Saratov. — 1999. — 113 p. [in Russ.]

Goryushinskii, 2007 – Goryushinskii V.S., Kozhevnikov V.A., Gubarev M.A. (2007). Rasshirenie funktsional'nykh vozmozhnostei sushchestvuyushchego parka bunkerov i kuzovov transportnykh sredstv nasypnykh [Expanding the functional capabilities of the existing fleet of bulk material bunkers and vehicle bodies] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. — Samara. — 2007. — Vol. 9(3). — Pp. 796–800. [in Russ.]

Denisov, 2001 – Denisov V.V., Kozhevnikov V.A. (2001). Ustroystva dlya vypuska trudnosypuchikh materialov iz silosov [Devices for releasing difficult-to-flow materials from silos] // Kombikorma. — 2001. — №5. — P. 17. [in Russ.]



Zhdanov, 2019 – Zhdanov A.G., Kozhevnikov V.A., Perevertov V.P., Svechnikov A.A. (2019). Eksploatatsiya nazemnykh transportno-tekhnologicheskikh sredstv: uchebnik v dvukh chastyakh. Ch. 1: Nadezhnost' [Operation of ground transport-technological means: textbook in two parts. Part 1: Reliability]. — Samara: SamGUPS.— 2019. — 214 p. [in Russ.]

Zhdanov, 2018 – Zhdanov A.G., Perevertov V.P., Kozhevnikov V.A., Svechnikov A.A. (2018). Patent №184049 (PM) “Svodo-razrushitel-ochistitel” [Patent №184049 (PM) “Vault destroyer-cleaner”] // Bank patentov, (2). — 1 p. [in Russ.]

Kozhevnikov, 2018 – Kozhevnikov V.A., Denisov V.V., Prusov M.V. (2018). Teoreticheskie issledovaniya protsessa ustraneniya zavisanii v bunkerah dlya khraneniya i transportirovki sypuchikh gruzov [Theoretical studies of the process of eliminating hang-ups in bins for storage and transportation of bulk cargo] // Vestnik transporta Povolzh'ya.— Samara: SamGUPS. — 2018. — №1.— Pp. 37–44. [in Russ.]

Kozhevnikov, 2009 – Kozhevnikov V.A., Goryushinskii V.S., Min'ko R.N. (2009). Analiz sushchestvuyushchikh tekhnologii razgruzki trudnosypuchikh gruzov iz bunkerov i kuzovov transportnykh sredstv [Analysis of existing unloading technologies for difficult-to-flow cargo from bins and vehicle bodies] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya,— Samara: SamGUPS. — 2009. — №1.— Pp. 43–49. [in Russ.]

Perevertov, 2020a – Perevertov V.P. (2020). Materialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnik [Materials science and flexible technologies: textbook]. — Samara: SamGUPS.— 2020. — 280 p. [in Russ.]

Perevertov, 2020b – Perevertov V.P. (2020). Diagnostika i upravlenie kuznechnymi mashinami v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh: monografiya [Diagnostics and control of forging machines in flexible manufacturing systems: monograph]. — Samara: SamGUPS. — 2020. — 291 p. [in Russ.]

Perevertov, 2020 – Perevertov V.P., Abulkasimov M.M., Akaeva M.M. (2020). Algoritm prinyatiya reshenii pri formoobrazovanii detaley v “umnykh proizvodstvennykh sistemakh” [Decision-making algorithm in forming parts in “smart manufacturing systems”] // Promyshlenniy transport Kazakhstana. — 2020.— №1(66). — Pp. 54–63. [in Russ.]

Tret'yakov, 2003 – Tret'yakov G.M., Goryushinskii V.S., Goryushinskii I.V., Shur V.L., Kozhevnikov V.A. (2003). Patent 2201813 C1 RU MKI B08G9/08, B65D88/68. “Perenosnoi svodoobrushitel-ochistitel” [Portable vault collapsers-cleaner]. — Opubl. 10.04.2003, Byul.— 2003. — №10. — 1 p. [in Russ.]

Zolkin, 2021 – Zolkin A.L., Galyanskiy S.A., Kuz'min A.M. (2021). Perspectives for use of composite and polymer materials in aircraft construction. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd.— 2021. — P. 12023. [in Eng.]

**ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР /
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ
СИСТЕМЫ / COMPUTER ENGINEERING AND
INFORMATION SYSTEMS**

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is. 2. Number 86 (2025). Pp. 57–64
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.005>
УДК 625.143.07

**INTELLIGENT TECHNOLOGIES AND MODELING OF THE TRANSPORT AND
LOGISTICS SYSTEM OF KAZAKHSTAN**

*G. Yerkeldessova**

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: erkeldesova.gulzada@mtgu.edu.kz

Gulzada Yerkeldessova — PhD, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan
E-mail: erkeldesova.gulzada@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6527-7180>.

© G. Yerkeldessova

Abstract. The transport and logistics system (TLS) of Kazakhstan plays a strategically important role in the development of the national economy and the country's integration into the Europe–Asia international transport corridors. Given the increasing volume of foreign trade and transit cargo flows, modernization of the TLS using intelligent and digital technologies has become a key factor in enhancing sector efficiency. This study analyzes modern methods and models applied in managing transport and logistics processes, including the implementation of intelligent transport systems, simulation modeling, automation of logistics operations, and digital platforms for container and multimodal terminals. Special attention is paid to the use of artificial intelligence, neural network solutions, and Big Data for route optimization, cargo flow management, and logistics risk forecasting. Issues of human resource provision and the training of specialists in new profiles are also discussed. The results demonstrate that integrating intelligent technologies significantly improves the speed and accuracy of transport operations, reduces costs, enhances monitoring and infrastructure management, and strengthens Kazakhstan's competitiveness on the international stage. The findings can be useful for researchers, transport and logistics professionals, and government agencies involved in developing the country's transport infrastructure.

Keywords: transport and logistics system, intelligent technologies, digitalization, modeling, Kazakhstan, container terminals, multimodal transport, logistics optimization

For citation: G. Yerkeldessova. Intelligent technologies and modeling of the transport and logistics system of Kazakhstan // Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 86. Pp. 57–64. (In Eng.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.005>

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

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ ТЕХНОЛОГИЯЛАР ЖӘНЕ ҚАЗАҚСТАННЫҢ КӨЛІК-
ЛОГИСТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕСІН МОДЕЛЬДЕУ**



*Г. Еркелдесова**

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: erkeldesova.gulzada@mtgu.edu.kz

Гульзада Еркелдесова — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: erkeldesova.gulzada@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6527-7180>.

© Г. Еркелдесова

Аннотация. Қазақстанның көлік-логистикалық жүйесі (КЛЖ) ұлттық экономиканы дамытуда және «Еуропа–Азия» халықаралық көлік дәліздеріне интеграциялауда стратегиялық маңызды рөл атқарады. Сыртқы сауда және транзиттік жүк ағынының артуы жағдайында КЛЖ-ны интеллектуалды және цифрлық технологияларды қолдана отырып жаңарту саланың тиімділігін арттырудың негізгі факторы болып табылады. Бұл зерттеуде көлік-логистикалық процестерді басқарудың қазіргі әдістері мен модельдері, соның ішінде интеллектуалды көлік жүйелерін енгізу, имитациялық модельдеу, логистикалық операцияларды роботтандыру және контейнерлік және мультимодальді терминалдарға арналған цифрлық платформалар қарастырылды. Арнайы назар жасанды интеллект, нейрондық желілер және Big Data технологияларын маршруттарды оңтайландыру, жүк ағымын басқару және логистикалық тәуекелдерді болжау үшін қолдануға аударылды. Саланың кадрлық қамтамасыз ету және жаңа мамандықтар бойынша кадрларды даярлау мәселелері зерттелді. Зерттеу нәтижелері интеллектуалды технологияларды интеграциялау көлік операцияларының жылдамдығы мен дәлдігін арттыруға, шығындарды қысқартуға, инфрақұрылымды бақылау мен басқаруды жетілдіруге, сондай-ақ Қазақстанның халықаралық аренадағы бәсекеге қабілеттілігін нығайтуға мүмкіндік беретінін көрсетті. Материал ғалымдар, көлік-логистика саласының мамандары және көлік инфрақұрылымын дамытумен айналысатын мемлекеттік органдар үшін пайдалы болады.

Түйін сөздер: көлік-логистикалық жүйе, интеллектуалды технологиялар, цифрландыру, модельдеу, Қазақстан, контейнерлік терминалдар, мультимодальді тасымалдаулар, логистиканы оңтайландыру

Дәйексөздер үшін: Г. Еркелдесова. Интеллектуалды технологиялар және Қазақстанның көлік-логистикалық жүйесін модельдеу // Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 86. 57–64 бет. (Ағыл. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.005>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КАЗАХСТАНА

*Г. Еркелдесова**

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: erkeldesova.gulzada@mtgu.edu.kz

Гульзада Еркелдесова — PhD, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: erkeldesova.gulzada@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0001-6527-7180>.

© Г. Еркелдесова

Аннотация. Транспортно-логистическая система (ТЛС) Казахстана играет стратегически важную роль в развитии национальной экономики и интеграции страны в

международные транспортные коридоры «Европа–Азия». В условиях роста внешней торговли и транзитных грузопотоков модернизация ТЛС с применением интеллектуальных и цифровых технологий становится ключевым фактором повышения эффективности отрасли. В настоящем исследовании проведен анализ современных методов и моделей управления транспортно-логистическими процессами, включая внедрение интеллектуальных транспортных систем, имитационное моделирование, роботизацию логистических операций, а также цифровые платформы для контейнерных и мультимодальных терминалов. Особое внимание уделено использованию искусственного интеллекта, нейросетевых решений и Big Data для оптимизации маршрутов, управления потоками грузов и прогнозирования логистических рисков. Рассмотрены вопросы кадрового обеспечения отрасли и подготовки специалистов новых профилей. Результаты исследования показывают, что интеграция интеллектуальных технологий позволяет повысить скорость и точность транспортных операций, сократить затраты, улучшить мониторинг и управление инфраструктурой, а также укрепить конкурентоспособность Казахстана на международной арене. Материал будет полезен для ученых, специалистов транспортно-логистического сектора и государственных органов, участвующих в развитии транспортной инфраструктуры.

Ключевые слова: транспортно-логистическая система, интеллектуальные технологии, цифровизация, моделирование, Казахстан, контейнерные терминалы, мультимодальные перевозки, оптимизация логистики

Для цитирования: Г. Еркелдесова. Интеллектуальные технологии и моделирование транспортно-логистической системы Казахстана//Промышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. №. 86. Стр. 57–64. (На англ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.005>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение.

Транспортно-логистическая система Казахстана является основой экономического развития страны, обеспечивая интеграцию внутренних и международных потоков грузов и пассажиров. Казахстан занимает стратегическое географическое положение на перекрестке транспортных коридоров «Западная Европа – Западный Китай» и «Север–Юг», что позволяет ему выступать в качестве транзитного моста между Европой, Азией и Южной Азиатской экономической зонами. Современные вызовы, связанные с ростом грузопотоков, усложнением логистических цепочек и необходимостью повышения скорости перевозок, требуют внедрения интеллектуальных технологий и современных моделей управления.

На сегодняшний день транспортно-логистический комплекс (ТЛК) включает железнодорожный, автомобильный, внутренний водный, воздушный и трубопроводный виды транспорта, а также складские и терминальные структуры. Существующие традиционные подходы к управлению ТЛК не всегда позволяют эффективно использовать транзитный потенциал страны и удовлетворять растущие требования международного рынка. В связи с этим актуальной становится разработка и внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС), цифровых платформ мультимодальной логистики, а также технологий на базе искусственного интеллекта и имитационного моделирования.

Цель исследования — проанализировать современные интеллектуальные технологии и модели транспортно-логистических систем, выявить их применимость в условиях Казахстана и определить направления оптимизации ТЛК для повышения его конкурентоспособности на международной арене.

Задачи исследования:

- Исследовать мировые и национальные тенденции развития ТЛС с применением интеллектуальных технологий.

- Рассмотреть современные методы цифровизации и моделирования логистических процессов.

- Проанализировать преимущества внедрения ИТС и цифровых платформ для оптимизации работы контейнерных и мультимодальных терминалов.
- Выявить основные проблемы кадрового обеспечения и подготовки специалистов в транспортно-логистическом секторе.
- Предложить рекомендации по интеграции интеллектуальных технологий для повышения эффективности ТЛК Казахстана.

Материалы и методы.

Методы исследования включают анализ литературных источников, статистических данных, применение методов имитационного моделирования и системного анализа. В работе используются как количественные показатели транспортной инфраструктуры, так и качественные характеристики логистических процессов и технологий.

Современные исследования транспортно-логистических систем (ТЛС) подчеркивают ключевую роль цифровизации и внедрения интеллектуальных технологий для повышения эффективности и конкурентоспособности отрасли. В мировом контексте развитие мультимодальной логистики и интеграция информационных систем становятся стандартом для обеспечения надежного и предсказуемого движения грузов (Кабашкин, 2010: 34). Международные транспортные компании активно внедряют решения на базе Big Data, машинного обучения, роботизации и автоматизированных систем управления для оптимизации цепочек поставок и сокращения затрат (Андреев, 2011: 111–120).

В Казахстане транспортно-логистический комплекс рассматривается как стратегический сектор экономики. По данным Вечкинзовой (Вечкинзова, 2020: 3297–3308), развитие ТЛК напрямую связано с ростом транзитного потенциала страны и интеграцией в международные транспортные коридоры. Особое внимание уделяется развитию железнодорожного транспорта, автодорог, портовой инфраструктуры и авиации. Анализ показал, что традиционные методы управления и планирования не обеспечивают достаточной эффективности в условиях увеличения объема международных грузоперевозок.

Другие исследователи отмечают, что применение интеллектуальных транспортных систем (ИТС) позволяет не только улучшить управление потоками, но и повысить безопасность движения, снизить эксплуатационные расходы и сократить время простоя транспорта (Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта, 2013: 90–107). ИТС включают в себя нейронные сети, телематические системы, интеллектуальные светофоры, датчики дорожного трафика, электронные системы оплаты и платформы мониторинга потоков грузов и пассажиров.

Современные подходы к моделированию ТЛС делятся на математические и имитационные (Кабашкин, 2010: 10–34). Математические модели применяются для анализа макроуровня — страны, города, микрорайона, где используются демографические данные, графы дорог, транспортный спрос и предложение. Имитационные модели позволяют создавать цифровые двойники логистических процессов, учитывать поведение отдельных транспортных средств, водителей, работу светофоров и условия окружающей среды. В последние годы возрастают возможности применения интеллектуальных алгоритмов, методов комбинаторной оптимизации и программирования для интеграции оперативного управления в имитационные модели, что повышает точность прогнозирования и эффективность логистических операций (Касымбекова, 2019: 99–101).

Казахстан занимает уникальное географическое положение, позволяющее использовать транзитный потенциал в международных перевозках. Основными направлениями развития транспортно-логистической системы страны являются:

Развитие мультимодальной логистики. Создание транспортно-логистических центров, объединяющих железнодорожные, автомобильные, морские и авиационные потоки. Особое внимание уделяется интеграции портов Актау и Каспийского региона с железнодорожной сетью и автотранспортными коридорами (Вечкинзова, 2020: 3305–3310).

Цифровизация и внедрение интеллектуальных систем. Применение ИТС, платформ мультимодальных перевозок, систем управления контейнерными терминалами и цифровых транспортных коридоров. Использование машинного зрения, нейросетей и Big Data позволяет повысить точность мониторинга, оптимизировать маршруты и предсказывать возможные логистические риски (Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта, 2013: 105–200).

Имитационное моделирование. Использование моделей для оптимизации работы контейнерных терминалов, распределения ресурсов, управления очередностью обслуживания грузов. Имитационные модели позволяют прогнозировать возможные сбои и разрабатывать стратегии оперативного вмешательства без риска для реальной инфраструктуры (Кабашкин, 2010: 35–37).

Автоматизация и роботизация. Внедрение роботизированных систем на складах и терминалах, автоматизированные процессы погрузки и разгрузки, снижение доли ручного труда, повышение точности операций и производительности (Андреев, 2011: 305–310).

Кадровое обеспечение. Подготовка специалистов нового профиля для работы с интеллектуальными системами, анализ текущих и прогнозируемых потребностей отрасли. Важным направлением является создание образовательных программ для подготовки высококвалифицированных специалистов в области логистики и цифровых технологий (Вечкинзова, 2020: 3302–3308).

Создание единой информационной платформы. Интеграция данных о мультимодальных потоках грузов, цифровых документах и логистических процессах для повышения прозрачности и скорости обработки информации. Казахстанский сегмент цифровых транспортных коридоров создается с целью интеграции с международными платформами и обеспечения более эффективного транзита (Кабашкин, 2010: 30–35).

Таким образом, модернизация ТЛС Казахстана требует комплексного подхода, объединяющего цифровизацию, интеллектуальные технологии, имитационное моделирование и подготовку кадров. Основная цель — повышение эффективности работы логистических цепочек, снижение затрат, обеспечение безопасности и предсказуемости транспортных потоков, а также усиление конкурентоспособности страны на международной арене.

Результаты и обсуждения.

На основании анализа существующих исследований и официальной статистики, можно выделить ключевые результаты и тренды развития транспортно-логистической системы (ТЛС) Казахстана в период 2014–2024 гг.

1. Рост объема перевозок и транзитного потенциала

За последние десять лет наблюдается устойчивый рост объемов грузоперевозок по основным транспортным коридорам Казахстана. По данным Министерства индустрии и инфраструктурного развития РК, объем железнодорожных перевозок увеличился с 140 млн тонн в 2014 году до 210 млн тонн в 2023 году. Автомобильный транспорт демонстрирует среднегодовой рост порядка 6–7 %, что связано с развитием сети автомагистралей, модернизацией пограничных переходов и увеличением внутреннего спроса на перевозки.

2. Внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС)

Внедрение ИТС позволило повысить оперативность управления транспортными потоками и снизить простои на ключевых узлах. Например, в Астане и Алматы внедрены системы мониторинга дорожного движения с использованием датчиков и камер, интегрированные с платформами прогнозирования заторов. На железнодорожных терминалах, таких как станция Сарыагаш и порт Актау, используются автоматизированные системы учета и распределения контейнеров, что позволяет сократить время обработки грузов на 20–30 %.

3. Имитационное моделирование логистических процессов

Моделирование работы контейнерных терминалов и распределительных центров показало высокую эффективность прогнозирования нагрузки на инфраструктуру и оптимизации распределения ресурсов. Например, цифровые модели портов Каспийского региона позволяют прогнозировать время обработки грузов, оптимизировать очередность судов и минимизировать простои. Анализ показывает, что применение имитационных моделей снижает логистические издержки на 10–15% и повышает пропускную способность терминалов.

4. Развитие мультимодальной логистики

Создание транспортно-логистических центров (ТЛЦ) в регионах Алматы, Атырау и Карагандинской области позволило объединить автомобильные, железнодорожные и морские перевозки в единую систему. Это способствует сокращению времени транзита, повышению надежности доставки и увеличению объемов международной торговли. По оценкам экспертов, эффективность таких центров позволяет ускорять движение грузов на 25–30% по сравнению с традиционной логистикой.

5. Автоматизация и роботизация складов и терминалов

Внедрение роботизированных систем погрузки и разгрузки, автоматизированных складских комплексов и платформ для обработки данных позволило снизить зависимость от ручного труда и минимизировать человеческие ошибки. На современных терминалах, таких как Астана Логистик Терминал, применяются роботизированные краны, автопогрузчики и автоматические сортировочные линии. Эффект от внедрения этих технологий проявляется в сокращении времени обработки грузов на 15–20 % и повышении точности учета.

6. Цифровая интеграция и единая информационная платформа

Создание национальной цифровой транспортной платформы позволило объединить данные о мультимодальных потоках, электронные документы и процессы управления транспортом. Платформа обеспечивает прозрачность операций, уменьшает вероятность ошибок и ускоряет обработку информации. Кроме того, интеграция с международными платформами способствует увеличению транзитного потока грузов через территорию Казахстана, укрепляя роль страны как ключевого транзитного хаба между Европой и Азией.

7. Проблемы и ограничения внедрения технологий

Несмотря на положительные результаты, ряд проблем сохраняется. Ключевыми являются:

- недостаточная инфраструктура на отдельных участках маршрутов;
- ограниченный кадровый потенциал специалистов в области цифровых логистических систем;
- высокие капитальные затраты на внедрение роботизированных и автоматизированных систем;
- необходимость гармонизации нормативно-правовой базы для интеграции с международными платформами.

Согласно исследованию Вечкиной, решение этих проблем возможно через государственные программы поддержки инноваций, обучение специалистов и расширение международного сотрудничества.

8. Перспективы развития

Перспективы развития ТЛС Казахстана включают:

- расширение сети транспортно-логистических центров;
- внедрение технологий интернета вещей (IoT) для мониторинга состояния транспортных средств и инфраструктуры;
- использование блокчейн-технологий для обеспечения прозрачности документооборота;

- развитие «умных» складов с автономными роботами и системами прогнозирования спроса;

- интеграцию с международными транспортными коридорами, такими как Китай–Европа и TRASECA, для усиления транзитного потенциала (Министерство индустрии и инфраструктурного развития РК, 2024: 14).

Таким образом, результаты анализа показывают, что цифровизация, интеллектуальные системы и имитационное моделирование становятся ключевыми инструментами повышения эффективности ТЛС. Внедрение данных технологий обеспечивает снижение затрат, ускорение обработки грузов, повышение безопасности и прозрачности транспортных процессов.

Заключение.

Проведённое исследование подтверждает, что транспортно-логистическая система (ТЛС) Казахстана играет ключевую роль в обеспечении экономического развития страны и её интеграции в международные транспортные коридоры. Анализ современных тенденций и внедрение интеллектуальных технологий показывают, что цифровизация и автоматизация логистических процессов являются основными факторами повышения эффективности ТЛС, сокращения времени обработки грузов и уменьшения издержек.

На основании проведённого анализа можно выделить несколько ключевых направлений развития транспортно-логистической инфраструктуры. Во-первых, внедрение интеллектуальных транспортных систем (ИТС), включающих нейронные сети, машинное зрение, системы мониторинга и предиктивной аналитики, позволяет не только оптимизировать движение транспортных средств, но и прогнозировать транспортные потоки, выявлять узкие места в инфраструктуре и оперативно корректировать маршруты. Во-вторых, цифровизация процессов в портах, на терминалах и складах обеспечивает прозрачность документооборота, повышает точность планирования и позволяет интегрировать национальные системы в международные транспортные коридоры.

Использование имитационного моделирования и построение цифровых двойников транспортных объектов дают возможность оптимизировать процессы мультимодальной логистики, минимизировать простои оборудования и снизить риск ошибок при оперативном управлении. Особенно важно внедрение интеллектуальных модулей оперативного планирования, которые позволяют учитывать взаимодействие различных субъектов транспортного процесса, управлять ограниченными ресурсами и адаптироваться к изменениям ситуации в реальном времени.

Однако анализ показывает, что современная ТЛС Казахстана сталкивается с рядом ограничений. Среди них — недостаточная квалификация кадров, необходимость модернизации инфраструктуры, высокая стоимость внедрения технологий и недостаточная нормативная регламентация отрасли. Решение этих проблем возможно через государственные программы поддержки инновационных проектов, создание учебных центров для подготовки специалистов, а также активное привлечение инвестиций в транспортно-логистические проекты.

Перспективы развития отрасли включают интеграцию технологий Интернета вещей (IoT), использование блокчейн-систем для документооборота, развитие «умных» складов, цифровизацию транспортных коридоров и построение мультимодальных логистических платформ. Реализация этих мер позволит не только повысить конкурентоспособность Казахстана как транзитного хаба между Европой и Азией, но и увеличить безопасность и экологическую устойчивость транспортной системы.

Таким образом, цифровизация, автоматизация и внедрение интеллектуальных технологий являются ключевыми факторами устойчивого развития транспортно-логистической системы Казахстана. Эти меры позволят стране не только укрепить позиции в глобальной транспортной сети, но и способствовать экономическому росту, развитию международной торговли и интеграции в Евразийское экономическое пространство. В

долгосрочной перспективе Казахстан может стать ведущим мультимодальным логистическим центром региона, обеспечивая оптимизацию транспортных потоков, снижение затрат и повышение качества предоставляемых услуг.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреев, 2011 — Андреев А. Материальная цивилизация, экономика и капитализм. — Том 1. Структуры повседневности: возможное и невозможное. — Москва: Прогресс. — 2011. — 623 с. [Eng.]
- Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта, 2013 — Интеллектуальные транспортные системы железнодорожного транспорта. — Москва: Транспорт. — 2013. — 208 с. [Russ.]
- Кабашкин, 2010 — Кабашкин А. Имитационное моделирование логистических процессов. — Санкт-Петербург: Логистика. — 2010. — 37 с. [Russ.]
- Касымбекова, 2019 — Касымбекова Л., Иванов П., Сидоров А. Цифровая интеграция транспортно-логистических систем // Вестник транспорта. — 2019. — № 5. — С. 99–101. [Russ.]
- Министерство индустрии и инфраструктурного развития РК, 2024. — Министерство индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан. Отчёт о развитии транспортно-логистической системы. — Астана. — 2024. — 14 с. [Kaz.]
- Вечкинзова, 2020 — Вечкинзова Е. Развитие транспортно-логистических центров в Казахстане // Логистика и управление цепями поставок. — 2020. — № 8. — С. 3305–3310. [Russ.]
- Аскарова, 2024 — Аскарова А. Атты әскер дивизиясының тағдыры // Егемен Қазақстан. — 2024. — 26 сентября (№ 183). — 15–17 с. [Kaz.]
- Бармакова, Касымова, 2020 — Бармакова А., Касымова Ж. Жетісулық қайраткерлері. — Алматы: Тауғұл-Принт. — 2020. — 200 с. [Kaz.]
- Аркешев, 2014 — Аркешев И. Целинная эпопея: разработка, принятие и осуществление первой хрущевской «сверхпрограммы» // Отечественная история. — 2014. — № 4. — С. 109–122. [Russ.]
- Турсынов, 2022 — Турсынов А. Интеллектуальные технологии в транспортно-логистических системах Казахстана // Вестник транспорта и логистики. — 2022. — № 2. — С. 45–52. [Russ.]

REFERENCES

- Andreev, 2011 — Andreev, A. Material'naya tsivilizatsiya, ekonomika i kapitalizm. — Tom 1. Struktury povsednevnosti: vozmozhnoe i nevozmozhnoe. — Moskva: Progress, 2011. — 623 p. [Eng.]
- Intellektual'nye transportnye sistemy zheleznodorozhnogo transporta, 2013 — Intellektual'nye transportnye sistemy zheleznodorozhnogo transporta. — Moskva: Transport, 2013. — 208 p. [Russ.]
- Kabashkin, 2010 — Kabashkin, A. Imitatsionnoe modelirovanie logisticheskikh protsessov. — Sankt-Peterburg: Logistika, 2010. — 37 p. [Russ.]
- Kasymbekova et al., 2019 — Kasymbekova, L., Ivanov, P., Sidorov, A. Tsifrovaya integratsiya transportno-logisticheskikh sistem // Vestnik transporta. — 2019. — No. 5. — P. 99–101. [Russ.]
- Ministerstvo industrii i infrastruktornogo razvitiya RK, 2024 — Ministerstvo industrii i infrastruktornogo razvitiya Respubliki Kazakhstan. Otchet o razvitiit transportno-logisticheskoi sistemy. — Astana, 2024. — 14 p. [Kaz.]
- Vechkinzova, 2020 — Vechkinzova, E. Razvitie transportno-logisticheskikh tsentrov v Kazakhstane // Logistika i upravlenie tsepyami postavok. — 2020. — No. 8. — P. 3305–3310. [Russ.]
- Askarova, 2024 — Askarova, A. Atti asker diviziyasynyng tagdyry // Egemen Kazakhstan. — 2024. — 26 sentyabrya (No. 183). — P. 15–17. [Kaz.]
- Barmakova, Kasymova, 2020 — Barmakova, A., Kasymova, Zh. Zhetisul'sul' kayratkerleri. — Almaty: Taugul-Print, 2020. — 200 p. [Kaz.]
- Arkeshov, 2014 — Arkeshov, I. Tselinnaya epopeya: razrabotka, prinyatie i osushchestvlenie pervoi Khrushchevskoi «sverkhprogrammy» // Otechestvennaya istoriya. — 2014. — No. 4. — P. 109–122. [Russ.]
- Tursynov, A., 2022 — Tursynov A. Intellektual'nye tekhnologii v transportno-logisticheskikh sistemakh Kazakhstana // Vestnik transporta i logistiki. — 2022. — No. 2. — P. 45–52. [Russ.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is.2. Number 86 (2025). Pp. 65–75
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.006>
УДК 681.5.037.8

REVIEW AND ANALYSIS OF SOFTWARE FOR MODELING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF A RAILWAY STATION BASED ON SIMULATION MODEL

*Y. Mailybayev**

International Transport and Humanities University, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: maylybaev.ersayyn@mtgu.edu.kz

Yersaiyn Mailybayev — PhD, Associate Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: maylybaev.ersayyn@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1977-3690>.

© Y. Mailybayev

Abstract. In the modern world, the efficiency and safety of railway systems are critical aspects of transport infrastructure. This study examines software tools for modeling the technological processes of railway stations and analyzes their advantages and limitations. Packages such as AnyLogic, Aimsun, AutoMod, and MvStudium were evaluated in terms of their functional capabilities, ability to conduct simulation experiments, optimize logistical processes, and manage operational activities. The results indicate that computerization and visual modeling of railway systems enhance operational efficiency, enable more effective resource utilization, and improve management of technological processes. Integrative modeling approaches allow for more accurate representation of technical and operational processes and provide a foundation for the future implementation of intelligent management systems. Moreover, the use of ergatic models enables consideration of human factors, improving modeling quality and allowing simulation of various operational scenarios. In conclusion, the study proposes new methods for developing functional models to assess and forecast the performance of railway stations, facilitating innovative, scientifically grounded solutions and supporting strategic planning in railway transport management.

Keywords: railway, modeling, computerization, station, logistics, operational efficiency, ergatic system

For citation: Y. Mailybayev. Review and analysis of software for modeling the technological process of a railway station based on simulation model // Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 86. Pp. 65–75. (In Eng.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.006>

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

ТЕМІРЖОЛ СТАНЦИЯСЫНЫҢ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ПРОЦЕСІН БАЛАМАЛЫҚ МОДЕЛЬ НЕГІЗІНДЕ МОДЕЛЬДЕУГЕ АРНАЛҒАН БАҒДАРЛАМАЛЫҚ ЖАСАҚТАМАЛАРҒА ШОЛУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

*Е. Майлыбаев**

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет Алматы, Қазақстан.

E-mail: maylybaev.ersayyn@mtgu.edu.kz



Ерсайын Майлыбаев — PhD, қауымдастырылған профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: maylybaev.ersayun@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1977-3690>.

© Е. Майлыбаев

Аннотация. Қазіргі заманда теміржол жүйелерінің тиімділігі мен қауіпсіздігі транспорттық инфрақұрылымның басты мәселелерінің бірі болып табылады. Бұл зерттеу теміржол станциясының технологиялық процесін модельдеу үшін әртүрлі бағдарламалық қамтамасыз етуді талдайды, олардың артықшылықтары мен кемшіліктерін салыстырады. AnyLogic, Aimsun, AutoMod және MvStadium сияқты бағдарламалық пакеттердің функционалды мүмкіндіктері қарастырылды, сонымен қатар олардың симуляциялық тәжірибелер жүргізу, операциялық және логистикалық шешімдерді оңтайландыру қабілеттері бағаланды. Зерттеу көрсеткендей, теміржол жүйелерін компьютерлендіру және визуалды модельдеу операциялық тиімділікті арттыруға, ресурстарды тиімді пайдалануға және технологиялық процестерді басқаруға мүмкіндік береді. Модельдеудің интегративтік тәсілдері техникалық және операциялық процестерді нақтырақ сипаттауға, болашақта интеллектуалды басқару жүйелерін енгізуге негіз береді. Сонымен қатар, зерттеу ергатикалық жүйелерді қолдану арқылы адам факторының әсерін есепке алу мүмкіндігін көрсетеді, бұл моделдеу сапасын арттырады және нақты сценарийлерді симуляциялауға мүмкіндік береді. Қорытындысында, теміржол станцияларының тиімділігін бағалау және болжау үшін функционалды модельдерді құрудың жаңа әдістері ұсынылады, бұл инновациялық және ғылыми тұрғыдан маңызды шешімдерге жол ашады.

Түйін сөздер: теміржол, модельдеу, компьютерлендіру, станция, логистика, операциялық тиімділік, ергатикалық жүйе

Дәйексөздер үшін: Е. Майлыбаев. Теміржол станциясының технологиялық процесін баламалық модель негізінде модельдеуге арналған бағдарламалық жасақтамаларға шолу және талдау//Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 86. 65–75 бет. (Ағыл. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.006>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СТАНЦИИ НА БАЗЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

*Е. Майлыбаев**

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: maylybaev.ersayun@mtgu.edu.kz

Ерсайын Майлыбаев — PhD, ассоциированный профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан
E-mail: maylybaev.ersayun@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0002-1977-3690>.

© Е. Майлыбаев

Аннотация. В современном мире эффективность и безопасность железнодорожных систем являются ключевыми аспектами транспортной инфраструктуры. В настоящем исследовании рассматривается программное обеспечение для моделирования технологического процесса работы железнодорожной станции, проводится анализ его преимуществ и недостатков. Оценивались пакеты AnyLogic, Aimsun, AutoMod и MvStadium с точки зрения их функциональных возможностей, способности проводить симуляционные



эксперименты, оптимизировать логистические процессы и управлять операциями. Результаты исследования показали, что компьютеризация и визуальное моделирование железнодорожных систем способствуют повышению операционной эффективности, более рациональному использованию ресурсов и улучшению управления технологическими процессами. Интегративные подходы к моделированию позволяют точнее описывать технические и эксплуатационные процессы, а также создавать основу для внедрения интеллектуальных систем управления в будущем. Кроме того, использование эргатических моделей позволяет учитывать влияние человеческого фактора, что повышает качество моделирования и дает возможность симулировать различные сценарии работы станции. В заключение предлагаются новые методы построения функциональных моделей для оценки и прогнозирования эффективности работы железнодорожных станций, что открывает путь к инновационным и научно обоснованным решениям.

Ключевые слова: железная дорога, моделирование, компьютеризация, станция, логистика, операционная эффективность, эргатическая система

Для цитирования: Е. Майлыбаев. Обзор и анализ программного обеспечения для моделирования технологического процесса железнодорожной станции на базе имитационной модели//Промышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. No. 86. Стр. 65–75. (На англ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.006>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

For modeling the railway technological process of a railway station (RS) based on a simulation model, many software tools have been proposed, but they solve the problems of modeling technological processes one-sidedly and do not provide unambiguous answers to questions of logistics or modeling of railway technological processes.

The current stage of railway development can be defined as the period from the 1990s to the present. Over the past decade, significant shifts in railway design automation have not occurred. Researchers are faced with unconventional problems covering numerous design aspects, which are difficult to formalize. Traditionally, the quality of design solutions largely depends on the level of designer qualification.

SCADA or CAD (computer-aided design) systems have been developed to automate complex project design processes. These systems allow integrated solutions for railway systems, providing visualization of locomotive positions using GPS and global satellite navigation. However, rapid CAD development is hindered by the heuristics of railway circuit construction.

Abroad, studies focused on developing transport CAD systems, emphasizing the mathematical formalization of railway structures using combinatorial, topological, matrix, and graph models. Foreign researchers also highlighted the importance of graphical representation of railway technical equipment. Two main research directions were identified in railway design automation: technical design of track infrastructure and technical-technological modeling of railway elements and processes (Dong, 2010: 12–15).

Despite these efforts, a complete solution has not yet been achieved. Heuristic methods require active human involvement, as CAD systems alone cannot provide full interactive control over railway development. Ergatic and graphoanalytic methods can automate railway modeling, but human participation remains essential for analyzing technological processes and overall performance.

The urgent task for modern railways is to determine estimated volumes of work for which simulation of railway functional states allows assessing technical equipment and technology compliance under uneven transportation conditions. Computerization of technical and operational assessment of railway work is now recognized globally, with a focus on creating intellectualized, automated systems.

Materials and methods.

The current stage of railway development can be conditionally defined as the period from the 1990s to the present. There have been no significant shifts in the direction of automation of railway design over the past ten years. An analysis of the results shows that researchers are faced with a rather unconventional problem that covers numerous aspects of design, and is difficult to formalize. The quality of the design solution with traditional approaches is determined, first of all, by the level of qualification of the designer (Maylybayev, 2024: 171).

The skills and experience of a professional solve the problem of linking the structure of the railway circuit with numerous internal and external factors, and there are no descriptive procedures for the designer's experience yet. During this period, a unified algorithmic approach to the interpretation of design requirements and rules for the implementation of station structures in the design begins to take shape. The so-called SCADA systems (or computer-aided design systems—CAD) are being developed (Maylybayev, 2024: 171; Harris, 2013: 172–174).

Such systems contribute to the introduction of automated forms of end-to-end development of the most complex projects. They cover all stages of design and allow obtaining integrated solutions for railway systems. The electronic circuits of the railway make it possible to track the condition of individual locomotives on the display screen at a point with coordinates determined by mobile GPS receivers via the global satellite navigation system (Li, 2020: 112936). The most important factor that began to hinder the rapid creation of an effective CAD railway was the heuristics of the very process of building a railway circuit. However, thanks to the efforts of scientists engaged in theoretical research in this field, and a number of theoretical and practical studies and publications, the cognitive orientation of the results obtained in this field of science has grown (Maylybayev, 2024: 171; Dong, 2010: 6–8).

Similar studies and works have also been conducted abroad (Goodman, 1998: 80–82; Kaakai, 2007: 5–7). For these works, a characteristic feature was the accumulation of materials on the problem of developing transport CAD systems. At the same time, the works of foreign colleagues were dominated by methodological works in the context of the development of mathematical methods, which formally described the structure of railway development. Combinatorial, topological, matrix, and graph models were used, which displayed essential features (Maylybayev, 2024: 171; Rohrer, 2000: 172–174).

Also, foreign researchers emphasized the importance of a correct graphical representation of the railway's technical equipment. All this combined made it possible to formulate a number of canonical requirements that are usually imposed on mathematical analogues of real railway circuits. The analysis of these works shows that there are two directions in which foreign scientists conducted their research in the field of railway design automation:

- technical design of the track infrastructure (Zauner, 2007: 3–5);
- technical and technological modeling of railway elements and processes (Karpov, 2006: 45–48).

Solving problems related to the CAD synthesis, domestic and foreign scientists did not focus only on a narrow range of problems of optimizing the geometric properties of projected objects. They also linked the models being developed with the development of wagon processing technologies. As a result of this dual orientation of research in the field of CAD of railway stations, scientists have so far failed to obtain a complete solution (Yatskiv, 2005: 237–239).

The heuristics of systems used for design automation at the beginning of the 21st century began to be associated with the need for direct active involvement in the design processes and analysis of design solutions for both performers and customers. In this case, design automation methods have become secondary and are used only as tools for reproducing the results of designers' activities.

In fact, the heuristic orientation of the design processes can be interpreted as the separation of the goals of designers and the CAD software environment itself. The capabilities of typical CAD systems turned out to be quite complete for the calculation and graphical modeling of railway

circuits. However, practically no CAD system provides full-fledged interactive control functions for designers over the progress of the railway development process. The weak side of many CAD systems is only the actual visual monitoring of the development of object structures.

CAD implements standard computer modeling techniques that allow designing and simultaneously visualizing the design results directly during development. As a result, it turns out that using direct methods of standard CAD, it is possible to develop integral structures of visual forms of railway stations and some technological objects. However, it is necessary to seriously rebuild the basic environment, complementing it with active modules of special content (Harris, 2013: 176–178).

The problem can be solved by using ergatic or graphoanalytic methods that ensure the construction of a model of railway operation in an automated mode (Li, 2020: 112940). However, human participation in the process of building a model and analyzing not only the overall performance of the railway but also the course of its technological processes dramatically reduces the duration of the modeling period.

In these conditions, an urgent problem for railways is the development of methods for determining estimated volumes of work, for which the results of modeling the functional states of railways (for a limited period of time) would allow making reasonable conclusions about the compliance of their technical equipment and technology with promising volumes of work. The calculation is carried out for conditions of uneven transportation (Dong, 2010: 10–12).

An analysis of the conducted research and modern publications on the problems of railway research has shown that the trend of scientific research related to the computerization of technological processes at railway stations and procedures for making operational decisions in the tasks of technical and operational assessment of railway work has become generally recognized worldwide (Kaakai, 2007: 6–8).

The creation of new models of computerization of technical and operational assessment processes, methods, and hardware-oriented algorithms for the intellectualization of these processes, provides a basis for scientific research in the field of organization of modern information technologies for the synthesis of automated systems of technical and operational assessment of railway work (Goodman, 1998: 85–87).

Results and discussion.

According to the estimates of domestic and foreign scientists, a significant increase in the effectiveness of the use of modern computer technologies is possible only by studying the general properties of mathematical modeling, methods of building intelligent systems, algorithms used in control tasks, features of modern and promising intelligent technologies for railways, as well as architectural features of automation systems for technical and operational assessment of work at railway stations.

AnyLogic (Li, 2020: 112950) is a multifunctional package designed for building simulation models. AnyLogic software is capable of supporting all the approaches that are encountered in the simulation process (Dong, 2010: 15–17). Its interconnected modules are focused on building models such as process-oriented, system-dynamic, agent-based, and multi-agent models. AnyLogic is capable of supporting combinations of the above models. Since the AnyLogic environment is written in Java, the flexibility and versatility of this language allow considering a wide variety of nuances during model construction.

It is possible to take into account a wide variety of configurations when modeling the operation of railway stations (Fig. 1). Graphical interfaces, tools, and libraries of AnyLogic allow accelerating the synthesis of models for a wide range of tasks. In AnyLogic, you can model not only production or logistics sectors but also solve problems of finding optimal management options for complex transport systems. Its advanced multimedia tools and real-time simulation animation provide researchers additional advantages in developing research plans and conducting experiments (Goodman, 1998: 90–92).

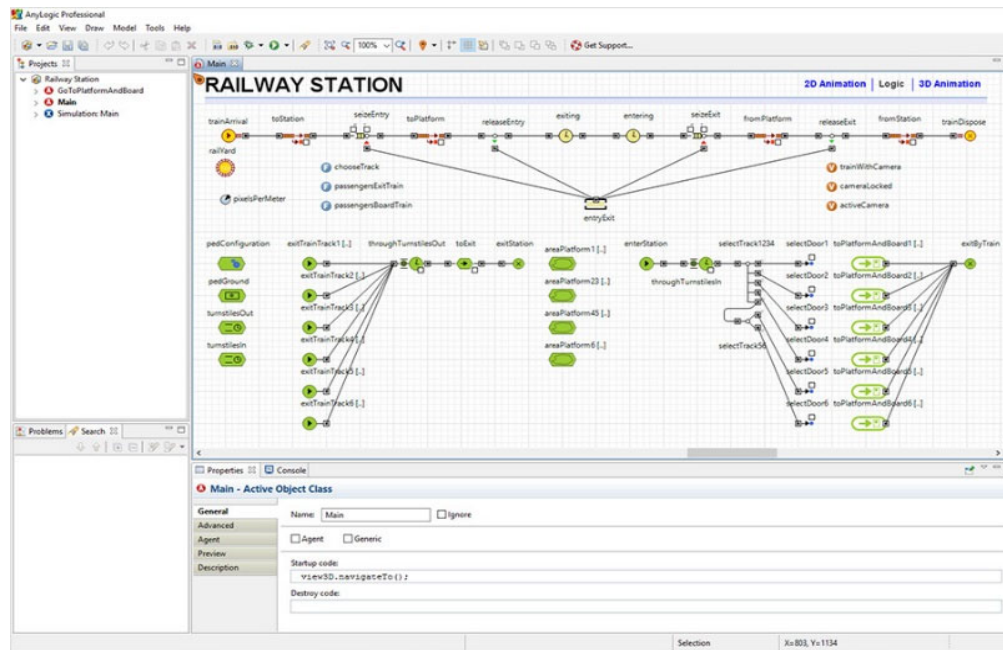


Fig. 1. General view of the AnyLogic modeling environment (Maylybayev, 2024: 173)

The Aimsun simulation package (Kaakai, 2007: 8–10) is software for traffic modeling. With thousands of licensed users in government agencies, universities, and consulting organizations worldwide, Aimsun stands out for its extremely high simulation speed.

AutoMod software (Rohrer, 2000: 180–182) is intended for building graphical models for visualizing logistics and production systems. AutoMod allows detailed analysis of operations and material flows in logistics and is widely used for analytical problems related to production processes. Its flexible structure makes it suitable for practical use across a wide variety of problem statements.

The AutoMod software, see Figure 2, has a fairly flexible structure, which makes it suitable for practical use for a wide variety of problem statements in a wide range of applied modeling by economic sectors.

Another interesting product in the field of production modeling is the MvStadium software (Fig. 3). This simulation environment allows you to analyze physical and dynamic systems. With MvStadium, you can quickly create and virtualize a wide variety of interactive models. Unlike other similar software products on the production modeling market, MvStadium allows us to consider multicomponent continuous, discrete and hybrid systems.

Systems built in the MvStadium environment can be analyzed using active computational experiments. Creating models, visualizing the results obtained during simulation experiments and the ability to manage computational experiments does not require researchers to write their own program code. Models can be described at the level of mathematical abstractions (Tolk, 2019: 135–152).

For example, a differential algebraic approach has been applied to describe the continuous behavior of a production or logistics system. In order to describe the discrete and hybrid (continuously discrete) behavior of the system, MvStadium uses the potential of visual behavior maps.

The advantages and disadvantages of the considered software packages are summarized in Table 1.

To simulate the operation of the station using these packages, a detailed railway model is required.

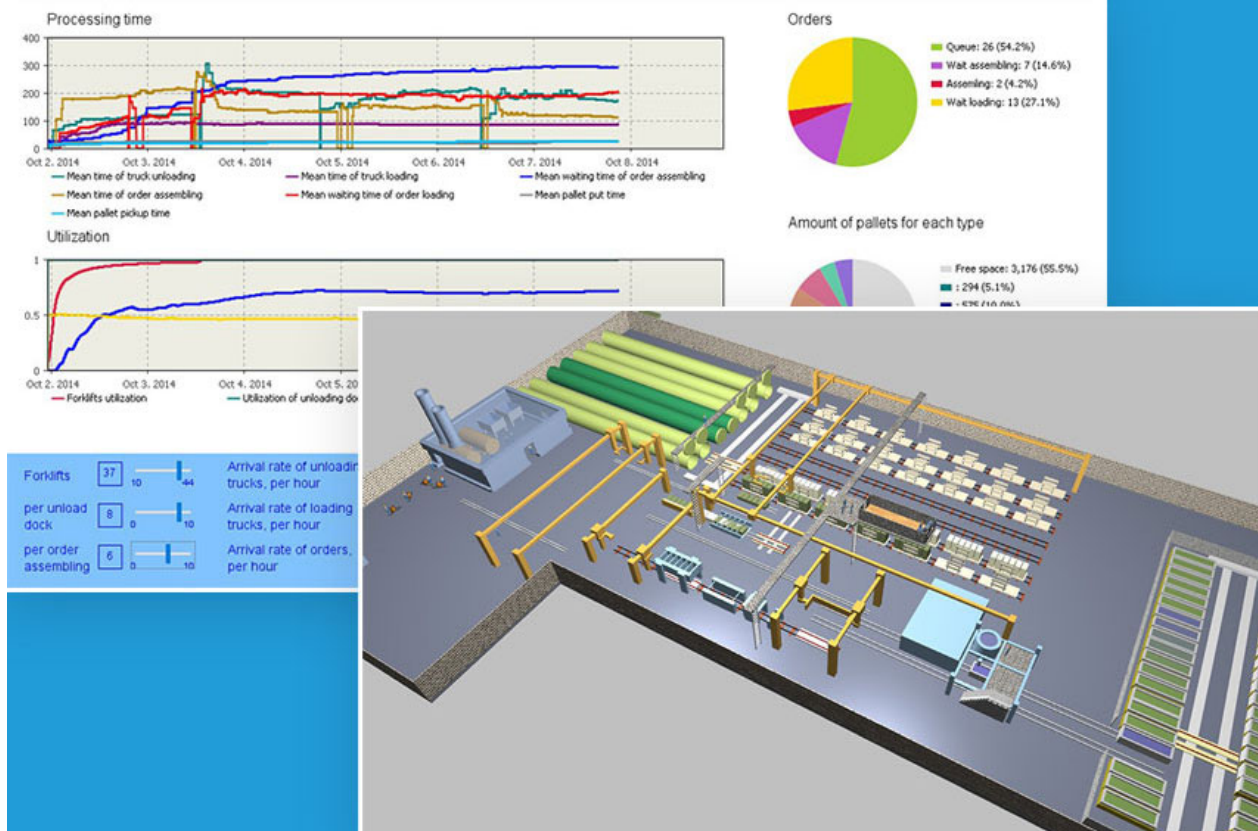


Fig. 2. General view of the AutoMod modeling environment (Maylybayev, 2024: 174)

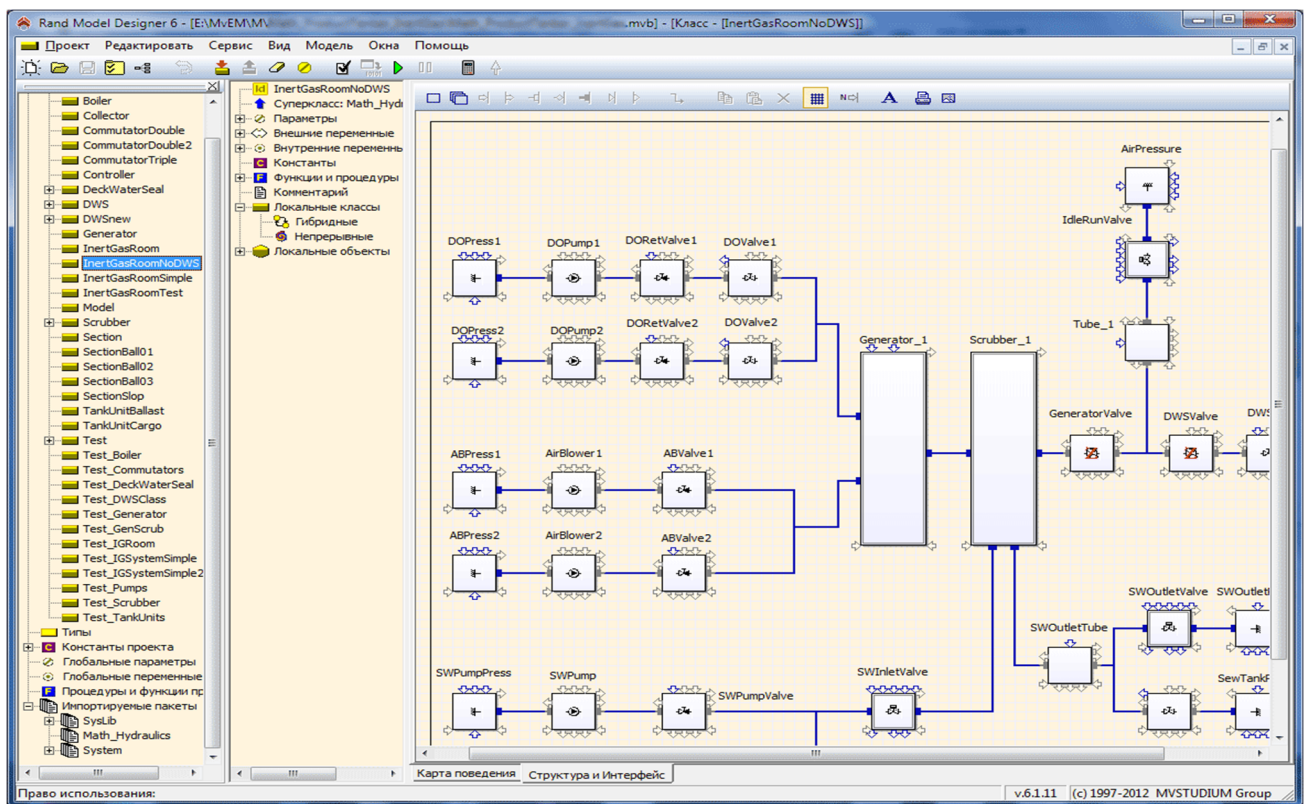


Fig. 3. General view of the MvStadium modeling environment (Maylybayev, 2024: 175)

Table 1 - Advantages and disadvantages of the considered software packages (Maylybayev, 2024: 175)

The system	Approach to Modeling	Advantages	Disadvantages
Arena	Discrete-event (DE)	It is possible to create your own templates and modules. A device for simulation experiments.	Only 1 approach to the model.
AGNES	<ul style="list-style-type: none"> • A Agent-based (A). • E Events are discrete. 	Cross-platform (Cross-platform). The possibility of simulation and full-scale modeling.	The cost of the license
GPSS	DE	An object-oriented modeling paradigm. The possibility of simulation and full-scale modeling.	Only 1 approach to the model. A complex interface.
AnyLogic	DE+A	Two approaches. Visualization, optimization, and proprietary libraries.	Only 1 approach to the model. The cost of the license.
Simplex3	DE	Chart visualization capabilities. Cross-platform	One approach. Subscribe to updates.
Simio	DE+A	Visualization of models, different forms of presentation of results.	Reduced functionality. A relatively small list of tasks to be solved.
SeSAm	A	Import vector and raster files, work with text files.	Only 1 approach to the model. Lack of support
SimPy	DE	The ability to run models in real time. Cross-platform.	Only 1 approach to the model. There is no visualization.
Aivika	DE+A	Cross-platform. Parallel computing.	A complex interface. A fairly long training period is required, taking into account the features

Note that these behavior maps are essentially extended state maps of the UML modeling language. MvStadium allows the automatic creation of computer models that correspond to a given mathematical formulation of the problem, and computational experiments can be conducted to verify the model's operability. The computer model can be implemented as a separate program or dynamic library, which allows it to be used independently of the MvStadium package. MvStadium supports an object-oriented modeling and programming paradigm, providing opportunities for users to create custom components based on the input language. The software also supports 2D and 3D animation, enabling a more comprehensive visualization of processes.

The railway station is a complex system closely integrated with the mainline railway transport system, shippers, and consignees, connected by numerous forward and backward flows that vary over time. Its technical infrastructure (tracks, shunting facilities, freight substations), control system (operational dispatch apparatus), and wagon traffic (VagT) are considered as enlarged elements of the station. Physical and information connections and corresponding channels are implemented between the system elements.

The external environment for the railway is the overall transport system. The state of the system is characterized by the degree of involvement of the station's technical facilities and operations in processing VagT. The input of the system is VagT and the information flow received by the railway station, while the output forms VagT and information streams sent from the station. The behavior of the system is determined primarily by the influence of the control system, which includes human dispatchers. Therefore, the railway can be interpreted as an ergatic system (Maylybayev, 2024: 176).



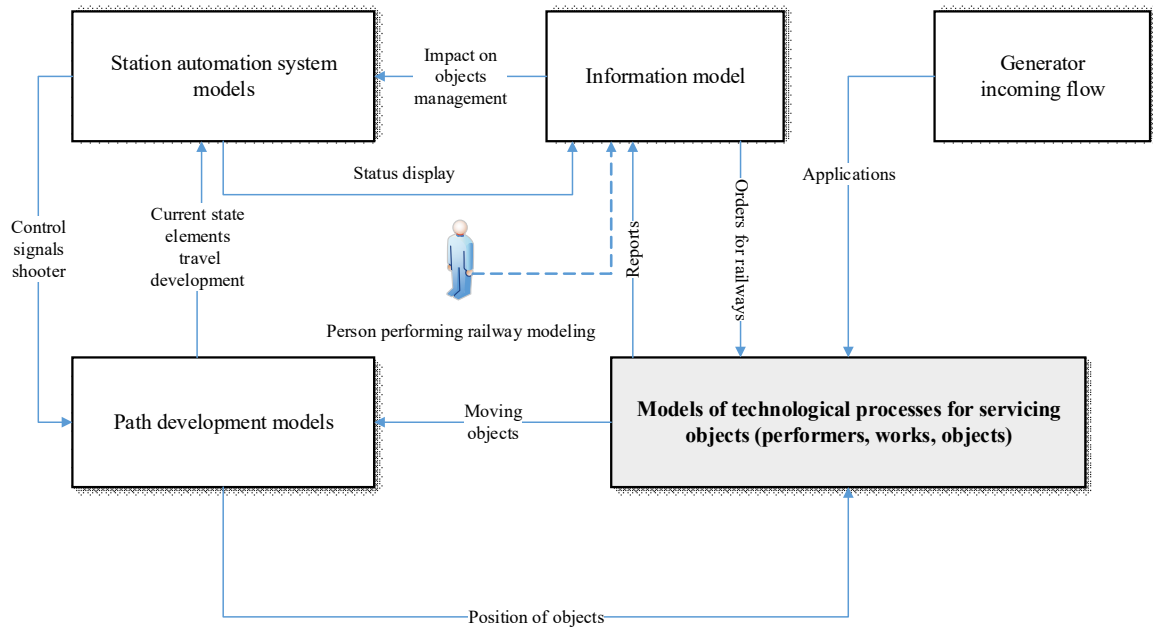


Fig. 4. Diagram of the ergatic railway system (Maylybayev, 2024: 176)

Taking into account the railway as a complex technical system and the degree of prior research, the following tasks are formulated for further research:

- development of procedures for identification of functional railway models;
- improvement of feasibility study methods for evaluating railway operations to account for changes in volume and structure over time;
- advancement of methods for functional modeling of railway operations using visual programming methods.

These tasks aim to enhance the accuracy, efficiency, and applicability of simulation models, ensuring that railway stations can be assessed, optimized, and managed effectively in real-world operational conditions (Maylybayev, 2024: 176).

Conclusion.

The review and analysis of software tools for modeling the technological processes of railway stations demonstrate that simulation modeling has become an essential method for the design, planning, and optimization of complex railway systems. The conducted study shows that modern railway stations represent highly interconnected technical systems, combining track infrastructure, shunting and freight facilities, operational dispatch control, and wagon traffic management. Each of these elements interacts with both internal and external factors, including fluctuating transport demand, seasonal variations in cargo and passenger flows, and real-time operational constraints.

The analysis reveals that traditional methods of railway planning and design, relying primarily on heuristic approaches and the experience of professional engineers, are insufficient to cope with the increasing complexity of modern railway operations. In particular, the reliance on manual calculations and static design principles often leads to suboptimal use of resources and reduced system efficiency. In contrast, simulation-based modeling allows for the comprehensive analysis of operational scenarios, evaluation of design alternatives, and prediction of system performance under variable conditions.

Among the reviewed software tools, AnyLogic demonstrates significant versatility due to its ability to integrate multiple modeling paradigms, including process-oriented, system dynamics, and agent-based approaches. Its Java-based environment allows for extensive customization and supports the modeling of highly detailed railway processes, from wagon dispatching to passenger flow management. Similarly, Aimsun and AutoMod provide high-speed traffic and logistics

simulations that are critical for operational planning and optimization. MvStudium, with its capacity to model hybrid continuous-discrete systems, offers unique advantages for analyzing complex technological processes and performing computational experiments without the need for extensive programming.

Despite the capabilities of these tools, the analysis indicates several common limitations. Many existing simulation platforms provide only partial interactivity, with insufficient mechanisms for real-time monitoring and adaptive control during model execution. Furthermore, the integration of simulation models with operational decision-making remains challenging, as most tools focus primarily on structural or process modeling rather than on functional or ergatic system analysis. The concept of the railway as an ergatic system, in which human operators and automated subsystems interact dynamically, requires further research and specialized modeling techniques.

The practical implications of these findings are significant. By adopting advanced simulation tools, railway operators can optimize station layouts, minimize operational bottlenecks, and improve the reliability and safety of railway operations. The integration of modeling and simulation into the planning process allows for the evaluation of different scenarios before their real-world implementation, thereby reducing risks associated with infrastructural investments and operational errors. Moreover, the ability to perform detailed simulations of wagon handling, track utilization, and resource allocation contributes to more efficient management of labor and material resources, enhancing overall system performance.

From a scientific perspective, the study highlights the need for further development of methodologies for identifying and parameterizing functional models of railway stations. This includes the formalization of performance indicators, defining operational constraints, and establishing standardized procedures for conducting simulation experiments. In addition, there is a need to integrate real-time data from railway operations, such as GPS tracking and sensor networks, into simulation models to enhance their predictive accuracy and operational relevance.

Finally, the research emphasizes the dual orientation of modern railway simulation: combining technical infrastructure design with operational process modeling. The synergy of these two approaches allows for a comprehensive assessment of railway station performance, including both structural integrity and technological efficiency. The development of intelligent algorithms, visual programming tools, and ergonomic interfaces will further support the decision-making process, facilitating the creation of robust, adaptive, and optimized railway systems capable of meeting the demands of modern transport networks.

In conclusion, simulation modeling represents not only a tool for technical analysis but also a strategic instrument for operational planning and optimization of railway stations. The continuous improvement and integration of advanced modeling software, combined with empirical data and functional identification methods, will provide the foundation for the next generation of railway station design and management. This approach ensures enhanced system reliability, increased operational efficiency, and better adaptation to dynamic transport conditions, contributing to sustainable and effective railway operations in the 21st century.

REFERENCES

- Dong, 2010 — Automatic train control system development and simulation for high-speed railways. // IEEE Circuits and Systems Magazine. — 2010. — 10(2). — Pp 6–18. [Eng.]
- Goodman, 1998 — A review of simulation models for railway systems. // 1998 International Conference on Developments in Mass Transit Systems Conf. Publ. — 1998.— No. 453. — Pp. 80–85. [Eng.]
- Harris, 2013 — Improving railway performance in Norway. — Journal of Rail Transport Planning & Management. — 2013. — 3(4). — Pp. 172–180.
- Maylybayev, 2024 — Maylybayev Ye., Shinykulova A., Zhumabekova D. Review and analysis of software for modeling the technological process of a railway station based on simulation model. // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2024. — Vol. 130. — № 1. — P. 171–178. [Eng.]
- Kaakai, 2007 — A hybrid Petri nets-based simulation model for evaluating the design of railway transit stations. // Simulation Modelling Practice and Theory. — 2007. — 15(1). — Pp. 5–12. [Eng.]

Karpov, 2006 — Simulation Modeling Systems. Introduction to Modeling with AnyLogic 5. — Saint Petersburg: BKHV-Peterburg. — 2006. — 400 p. [Eng.]

Li, 2020 — An improved operation strategy for CCHP system based on high-speed railways station case study. — Energy Conversion and Management. — 2020. — 216. — P. 112936. [Eng.]

Rohrer, M. W., 2000 — AutoMod tutorial [simulation package]. // 2000 Winter Simulation Conference Proceedings. — 2000 —T. 1. — Pp. 170–176. [Eng.]

Yatskiv, 2005 — Using the capabilities of simulation modeling for transport nodes analysis. Simulation Modeling. Theory and Practice (IMMOD-2005). —2005. — Pp. 237–245. [Eng.]

Zauner, 2007 — Modeling Structural-Dynamics Systems in MODELICA/Dymola; MODELICA/Mosilab and AnyLogic. // Proceedings of the 1st International Workshop on Equation-Based Object-Oriented Languages and Tools: Berlin, Germany, July 30. —2007. — № 024. — Pp. 330–346. [Eng.]

Tolk, 2019 — Tolk, A., & Joines, J. Simulation for Smart Rail Transportation: Concepts, Models, and Applications. Simulation Modelling Practice and Theory. — 2019. — 93. — Pp. 135–152. [Eng.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is. 2. Number 86 (2025). Pp. 76–89
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.007>
UDK 620.79

AUTOMATIZATION DESIGN OF FLEXIBLE SYSTEMS FOR MANAGEMENT WITH DECENTRALIZED CONTROL

*O. Umbetov*¹, *G. Morokina*^{2*}, *T. Khuven*³

¹Taraz State University, Taraz, Kazakhstan;

²Saint Petersburg Mining University, St Petersburg, Russia;

³M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan.

E-mail: galinasm404@mail.ru

Omirbek Umbetov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Taraz State University, Taraz, Kazakhstan

E-mail: uumbetov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6931-7944>;

Galina Morokina — Doctor of Technical Sciences, Professor, Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia

E-mail: galinasm404@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2504-6449>;

Tsen Huven — Doctor of Technical Sciences, Professor, M. Auezov South Kazakhstan State University, Shymkent, Kazakhstan

E-mail: qbcba@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0824-8858>.

© O. Umbetov, G. Morokina, T. Khuven

Abstract. This article examines automated control systems for complex technical complexes using the Tracemode software environment, which enables efficient management of industrial processes and the design of control systems. The objective of the study is to identify effective methods for managing complex industrial processes using decentralized and hierarchical control systems. The tasks include management of autonomous local blocks, use of Tracemode 6 for computer-aided design, simulation of industrial signals, and development of students' practical skills. Using Tracemode 6, students can monitor processes virtually, manage projects remotely, and utilize embedded libraries and ready-made blocks to develop practical skills. The software environment allows the creation of modules for economic and personnel management. Video tutorials, webinars, and online practical sessions provide international access to education. Tracemode engages students in research activities, project integration, and simulation of industrial processes, enhancing hands-on experience. Applying Tracemode improves the training quality for engineering, technical, and economic specialties. Its flexible and modular structure allows students to create integrated projects, control industrial processes, and conduct experiments, bridging theoretical knowledge and practical skills effectively.

Keywords: Tracemode, automated control systems, decentralization, hierarchical control, computer-aided design, educational process, industrial processes

For citation: O. Umbetov, G. Morokina, T. Khuven. Pautomatization design of flexible systems for management with decentralized control//Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 86. Pp. 76–89. (In Eng.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.007>

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



ОРТАЛЫҚТАНДЫРЫЛМАҒАН БАСҚАРУМЕН БАСҚАРУДЫҢ ИКЕМДІ ЖҮЙЕЛЕРІН АВТОМАТТАНДЫРУДЫ ЖОБАЛАУ

Ө. Үмбетов¹, Г. Морокина^{2*}, Ц. Хувен³

¹Тараз мемлекеттік университеті, Тараз, Қазақстан;

²Санкт-Петербург Тау-Кен Университеті, Санкт-Петербург, Ресей;

³М. Әуезов Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік Университеті, Шымкент, Қазақстан.

E-mail: galinasm404@mail.ru

Өмірбек Үмбетов — т.ғ.д., профессор, Тараз мемлекеттік университеті, Тараз, Қазақстан
E-mail: uumbetov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6931-7944>;

Галина Морокина — т.ғ.д., Санкт-Петербург кен университеті, Санкт-Петербург, Ресей
E-mail: galinasm404@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2504-6449>;

Цен Хувен — т.ғ.д., профессор, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан мемлекеттік университеті, Шымкент, Қазақстан

E-mail: qbcbaba@bk.ru, <https://orcid.org/009-0001-0824-8858>.

© Ө. Үмбетов, Г. Морокина, Ц. Хувен

Аннотация. Бұл мақала күрделі техникалық кешендерді автоматтандырылған басқару жүйелері тұрғысынан зерттейді, Tracemode бағдарламалық ортасын қолдану арқылы өндірістік процестерді тиімді басқару мен жобалау мүмкіндіктерін қарастырады. Зерттеудің мақсаты – децентрализованды және иерархиялық басқару жүйелерін қолдану арқылы күрделі өндірістік процестерді тиімді бақылау әдістерін анықтау. Міндеттері: автономды локалды блоктар арқылы жергілікті басқару, Tracemode 6 бағдарламалық ортасында компьютерлік жобалау және өндірістік сигналдарды модельдеу, сондай-ақ студенттердің білімін практикалық тұрғыдан жетілдіру. Tracemode 6 қолдану арқылы студенттер өндірістік процестерді виртуалды түрде бақылауды үйренеді, жобаларды қашықтан басқаруды жүзеге асырады, дайын кітапханалар мен блоктарды пайдаланып практикалық дағдыларын дамытады. Бағдарламалық ортада модульдер құру арқылы экономикалық және кадрлық мәселелерді шешуге болады. Видео сабақтар, вебинарлар және онлайн практикумдар студенттерді халықаралық деңгейде оқытуға мүмкіндік береді. Tracemode ғылыми-зерттеу жұмыстарына қатысу, жобаларды біріктіру және өндірістік процестерді модельдеу арқылы практикалық дағдыларды жетілдіруді қамтамасыз етеді. Бағдарламалық ортаны қолдану инженерлік, техникалық және экономикалық мамандықтардағы студенттердің кәсіби дайындығын арттырады. Tracemode икемді, модульдік құрылымымен студенттерге интеграциялық жобаларды құруға, өндірістік процестерді бақылауға және эксперименттер жүргізуге мүмкіндік береді, бұл теориялық білім мен практикалық дағдыларды біріктіреді.

Түйін сөздер: tracemode, автоматтандырылған басқару жүйелері, децентрализация, иерархиялық басқару, компьютерлік жобалау, оқу процесі, өндірістік процестер

Дәйексөздер үшін: Ө. Үмбетов, Г. Морокина, Ц. Хувен. Орталықтандырылмаған басқарумен басқарудың икемді жүйелерін автоматтандыруды жобалау//Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 86. 76–89 бет. (Ағыл. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.007>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИБКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

О. Үмбетов¹, Г. Морокина^{2*}, Ц. Хувен³



¹Таразский государственный университет, Тараз, Казахстан;

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия;

³Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауезова, Шымкент, Казахстан.

E-mail: galinasm404@mail.ru

Омирбек Үмбетов — д.т.н., профессор, Таразский государственный университет, Тараз, Казахстан

E-mail: uumbetov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6931-7944>;

Галина Морокина — д.т.н., Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: galinasm404@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2504-6449>;

Цен Хувен, д.т.н., профессор, Южно-Казахстанский государственный университет им. М. Ауезова, Шымкент, Казахстан

E-mail: qbcba@bk.ru, <https://orcid.org/009-0001-0824-8858>.

© О. Үмбетов, Г. Морокина, Ц. Хувен

Аннотация. Статья посвящена исследованию автоматизированных систем управления сложными техническими комплексами с использованием программной среды Tracemode, позволяющей эффективно управлять промышленными процессами и проектировать контрольные системы. Цель исследования – определить эффективные методы управления сложными производственными процессами с применением децентрализованных и иерархических систем. Задачи включают управление автономными локальными блоками, использование Tracemode 6 для компьютерного проектирования, моделирования промышленных сигналов и развитие практических навыков студентов. С использованием Tracemode 6 студенты могут виртуально контролировать процессы, управлять проектами удаленно, применять встроенные библиотеки и готовые блоки для развития практических навыков. Программная среда позволяет создавать модули для решения экономических и кадровых задач. Видео уроки, вебинары и онлайн-практикумы обеспечивают международный доступ к обучению. Tracemode способствует участию студентов в научно-исследовательской деятельности, объединению проектов и моделированию производственных процессов, развивая практические навыки. Применение Tracemode повышает качество подготовки студентов инженерных, технических и экономических специальностей. Гибкая и модульная структура позволяет создавать интегрированные проекты, контролировать процессы и проводить эксперименты, объединяя теоретические знания с практическими навыками.

Ключевые слова: tracemode, автоматизированные системы управления, децентрализация, иерархическое управление, компьютерное проектирование, образовательный процесс, производственные процессы

Для цитирования: О. Үмбетов, Г. Морокина, Ц. Хувен. Автоматизация проектирования гибких систем управления с децентрализованным управлением//Промышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. No. 86. Стр. 76–89. (На англ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.007>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

The article focuses on the management of objects that significantly differ from the traditional management of classical complexes, being considered as complex technological systems. Complex technological systems constitute a substantial part of industry, where a large number of technological regimes and industrial scales must be controlled, often through the integration of various mathematical and physical models. Examples of such objects include corporations, plants,

workshops, and both small and large enterprises. The complexity of these technological systems arises not only from the technological processes and technical organization but also from specific economic laws (Mailybaev, 2019: 113–116).

Managing such objects requires a novel approach due to their unique functions. The theory of object management is based on a systematic approach, which accounts for the interrelations between individual system elements and factors and characterizes the behavior of the system as a whole. One method is the decomposition of the management system, which divides a system into separate subsystems. This decomposition simplifies complex tasks into manageable units, each of which is solved within its subsystem.

A key feature distinguishing complex technological systems from traditional management objects is the existence of purposeful functions within each subsystem. Notably, the local functions of subsystems often do not coincide with the global objective function of the entire system. In decision-making, subsystems tend to maximize or minimize their local functions under existing constraints, which may vary according to the significance of incoming parameters.

Management systems of large-scale objects are often structured as distributed, multilevel systems. The coordinating body at the top of the hierarchy makes system-wide decisions and interacts with all subsystems at lower levels. Decisions are reached through an informational exchange between the coordinating authority and subsystems, aiming to optimize both local and global objective functions.

The development of integrated automated control systems, which manage both technological processes and production-economic activities simultaneously, represents a natural progression of large system theory. For instance, the integrated software environment Tracemode exemplifies automatic programming and control in production, illustrating the practical application of flexible decentralized control systems.

The aim of this study is to demonstrate methods for building flexible, decentralized management systems in complex technological systems, using Tracemode as a case study. This includes mathematical modeling, decomposition of management tasks, hierarchical control, and integration of subsystems to achieve optimal system performance.

Materials and methods.

The principal feature of complex technological systems, compared with traditional management objects, is the presence of a purposeful function in each subsystem. It should be noted that the local purposeful functions of subsystems do not coincide with the global purposeful function of the entire complex (Morokina, 2019: 218). When making decisions, each subsystem aims to maximize or minimize its objective function among multiple possible alternatives, defined by all existing constraints; thus, an extremum problem is solved, and its specific data can change depending on the significance of input parameters (Umbetov, 2013: 85–89; Jose, 2015: 48–52).

Management systems for large-class objects are often structured as distributed, multilevel systems. The decision-making body at the system-wide level, called the coordinating authority, maintains bidirectional connections with all subsystems at lower hierarchical levels. Decisions are made through informational exchange between the coordinating authority and subsystems, where coordinating parameter values are communicated, and subsystems optimize their local functions accordingly. The resulting decision represents an agreed-upon solution between the coordinating authority and subsystems, achieving the optimal value of objective functions.

Key features of complex industrial systems include (Shukaev, 2013: 90–92):

- A large number of nodes,
- Complexity of various interconnections,
- Connections in the form of information, material, or energy flows,
- Human involvement in system operations,
- Presence of subsystems with local objective functions,
- Optimization of these functions during production.

The introduction of integrated automated control systems, which manage production and technological processes simultaneously, is a logical evolution of large systems theory. For example, the Tracemode integrated software environment enables automatic programming of measurement and control systems.

Flexible systems design with decentralization: Practical problem-solving requires consideration of information flows and their interactions. Decision-making often employs heuristic methods at the subsystem level, producing a decision vector that is refined at lower hierarchy levels (Morokina, 2019: 1–5) (Figure 1).

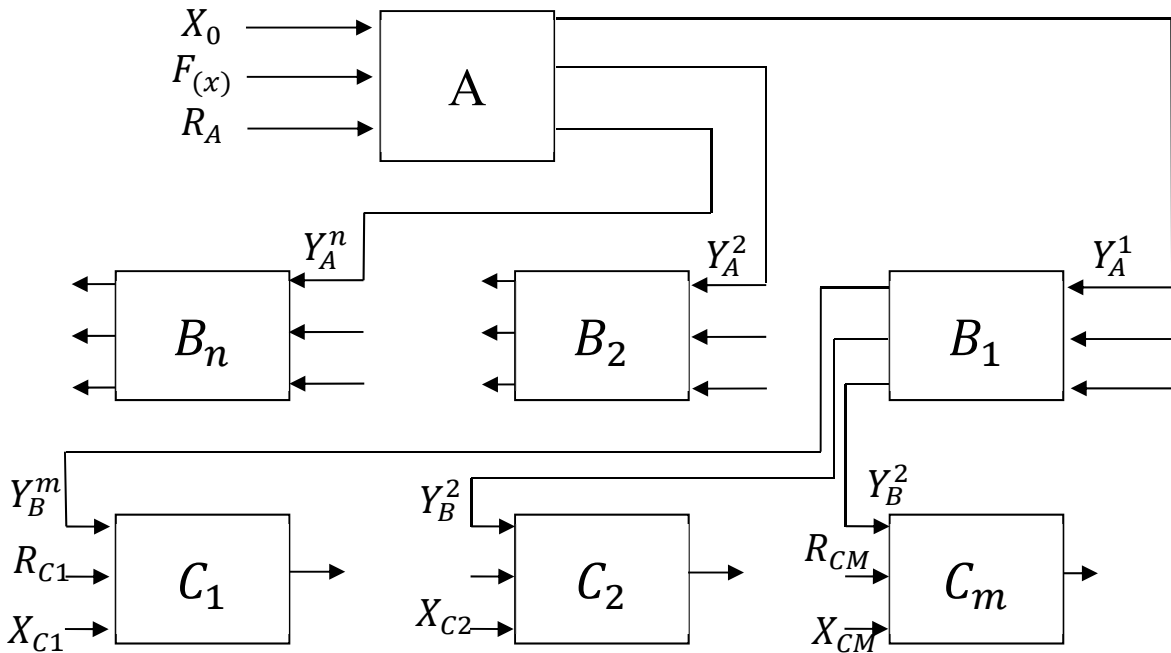


Fig. 1. Information flows in hierarchical control systems. $F_{A(x_0)}$ - the target function, R_A - the set of feasible solutions, X_A - the vector of the system state, Y_A - the control actions (Morokina, 2019: 1–5)

The path of the control signal from the coordinating body to the production element traverses various systems via the operators of the controlling parts of the subsystems. Here the properties of the subsystems become clearly manifested, especially due to human participation in their operation (Umbetov, 2013: 85-89). Such elements are often called active (Morokina, 2019: 1–5).

The active element has its own target function, which in most cases differs from that of the central part. This function is often unknown to the central part and may change over time depending on circumstances affecting the subsystems (Morokina, 2016b: 101-103). Naturally, when devising a solution, the governing body of the subsystem always seeks to maximize its target function. Other features of active elements are to some extent related to those already noted. The active element may be aware of the main provisions of the strategy of the central authority. The subsystem maximizes its target function not only in the present but also in future periods, and its strategy takes account of this fact, giving it a chance to compensate for possible losses (Morokina, 2019: 1–5; Umbetov, 2015: 273-275).

Subsystems have a choice between two strategies (1 and 2) (Umbetov, 2016c: 147-149). The effect of applying these strategies over time varies. However, when solving optimization problems, the subsystem typically takes into account future criteria with a time-dependent coefficient $k(t)$, so if we take this property into account, the target function can be expressed, for example, as:

$$J = \int_0^T k(t) \cdot \bar{J}(t) dt$$

where $J(t)$ is the value of the optimality criterion in time, $k(t)$ is the weight coefficient, T is a sufficiently long time interval. The properties of the function $k(t)$ depend on factors, mainly of a psychological nature.

Many well-known examples of this property's manifestation by an active element can be given (Morokina, 2014a: 398-400). The subsystem generates information supplied to the centre so as to maximise its target function. This understandable property most often manifests in transmission of information about the true capabilities of the production unit. It is also important to note that, in contrast to technical systems, true information that is disadvantageous to the subsystem cannot be obtained even by observation or experimentation. The implementation of the central authority's strategies is not fully carried out by the subsystem, but only to some degree, in order to comply with all constraints in solving the problem.

Setting optimal control tasks as considered below are characteristic of many industries because of the widespread use of automated systems of various levels in the energy, machinery, instrument-making, chemical and other industries. The use of a decomposition approach to their solution is promising in terms of building hierarchical control systems. The introduction of flexible automated control systems, based on the latest achievements in control theory, advanced hardware and technical support using microprocessor-based computing equipment and wide application of controllers for various purposes, can be considered one of the main directions of production development and improvement at the present stage (Umbetov, 2016: 147-149).

When designing a decentralized control system for an industrial object of the class of a complex technological system (CTS), in order to ensure the flexibility characteristic of the CTS, it is necessary to consider possible changes in its structure. The structure of the CTS is understood as the totality of its elements and the relationships among them. Reorganisation of the CTS's structure is required when a number of influencing factors change, for example, indicators of raw-material quality, indicators of technological production mode, demand for products, etc. (Umbetov, 2016: 147-149; Morokina, 2016b: 101-103).

Let us consider the essence of the stated approach. The state of the CTS is uniquely determined by its structure and the values of the mode variables for each element of the system. We consider the problem of constructing an optimal CTS with a flexible tunable structure. As the criterion of optimal functioning of the system, we take a qualitative indicator of the product being produced, which is an additively separable function of the state variables of the system (Umbetov, 2013: 85-89; Umbetov, 2016c: 147-149).

Suppose that the system is in a certain state, determined by the vector of determining factors W^i , $i = 1, m$, where m is the number of different vectors. If at time t vector W^i , changes to W^{i+1} , then it is necessary to change the state of the system, which must be optimal in accordance with the selected criterion of the quality of functioning of the CTS. In this case, it is necessary to solve the optimization problem, consisting of two interconnected subtasks - the choice of the optimal structure of the system and the determination of the values of the mode variables with the changed structure of the CTS.

Let's consider the subtask of choosing the optimal structure of the system. We will introduce the set of $W = \{W^i\}$, $i = 1, \dots, m$ - the set of vectors of the determining CTS factors and the set of possible structures of the system $S = \{S_k\}$, $k = 1, \dots, L$, where L is the number of admissible structures CTS, uniquely determined by the type of specific technological process.

We define a mathematical description of the structure S_k . Each structure of the system is described by a square matrix $A = \|a_{ij}\|$ of dimension $(n * n)$. The elements of the matrix take the following values (Umbetov, 2016c: 147-149):

- $a_{ij} = 1$, if the connection between the i and j elements is possible,
- $a_{ij} = 0$ otherwise.

If the i -th element is off, then $a_{ij}=0, j = 1, \dots, n$. Matrix A can be corrected by introducing new connections between elements or excluding existing ones.

Let us introduce the matrix of changes in the structure of the system $B=||B_{ij}||$ of dimension $(n * n)$. The element $B_{ij}=-1$, if the connection between the i -th and j -elements is excluded, if the connection between the i -th and j -th elements is not broken or does not exist, then $B_{ij}=0$.

The matrix B is a control action on the structure of the system, i.e. it implements on / off control of system elements.

The structure of the system at some point in time is described by the matrix of the current $D=||d_{ij}||, i, j = 1, \dots, n$, where $d_{ij} = 1$, if there is a connection between the i th and j th elements and $d_{ij} = 0$ otherwise. The matrix D is the composition of the matrices A and B , i.e. $D = A + B$ (Umbetov, 2016: 147-149). Thus, the elements of the set S can be described by a set of matrices $D^k (k = 1, \dots, n)$.

Mathematically, the static optimization problem of a flexible CTS is written similarly to an optimal control problem for a decentralized control system (Umbetov, 2013: 85–89):

$$\max_{D^k} \max_{x,u,y} \sum_{i=1}^n f_i(x_i, D^k, u_i, y_i) \tag{1}$$

$$y_i = g(x_i, u_i), h_i(x_i, u_i, y_i) \geq 0 \tag{2}$$

$$D^k=A+B, C_{ij} = \psi(D_{ij}^k) \tag{3}$$

$$x_i = \sum_{j=1}^n C_{ij}y_j, i, j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, L \tag{4}$$

- where x_i, u_i, y_i are the vectors of the input, control, and output variables of the i -th element, respectively; $f_i(x_i, D^k, u_i, y_i)$ is the target separable function describing the efficiency of the i -th element; $g(x_i, u_i)$ is a vector function that determines the relationship between the variables of the i -ro element;

- $h_i(x_i, u_i, y_i)$ is a vector function that takes into account constraints on variables; C_{ij} is the connection matrix between the j th output and the i -ro input; the operator ψ characterizes the connection between the elements of the submatrix D_{ij}^k of the matrices D^k and C_{ij} (Umbetov, 2016: 147–149).

The equations (3) allow us to determine the values of the elements of the matrices C_{ij} when passing from one structure to another.

In the static optimization problem (1) - (4), it is necessary to find the maximum of the objective function by choosing a certain system structure and variables that determine the functioning modes of the elements of the CTS. This task can be solved by enumerating all the structures of the system. Moreover it is necessary to optimize the mode variables for each fixed structure D^k . However, this approach is ineffective, since it requires a lot of machine time. For this reason, the solution of problem (1) - (4) is conveniently divided into two stages. At the first stage, the problem of choosing the optimal structure is solved, at the second stage, when the fixed structure is found, the suboptimal values of the mode variables are determined (Umbetov, 2016: 147–149).

The problem of structural optimization is proposed to be solved using the principles of pattern recognition. To do this, we need to find a subset of structures $S_j \subset S (\cup S_j = S, S_i \cap S_j = 0)$ that are close to optimal, and then choose the optimal structure among this subset, which is much smaller than the set S . In solving this problem, we use classification methods that allow us to put a certain subset of S_j structures in accordance with each vector of the determining factors W^i . For this we divide the set S into classes according to the technological principle. Then, based on the experimental data and expert estimates (Umbetov, 2016c: 147-149), we find a

correspondence between the classes of the set S and some subset W^*W . Using W^* as the training material, a classification rule is constructed that allows the set of W^i to be divided into subsets or classes. Such a partition can be done using the method of group arguments accounting. The classification W defines a class of structures close to optimal. Next, to find suboptimal structures needed to make the enumeration of all structures within the selected class. This solves the problem of parametric optimization (1) - (4) with a fixed D^k structure. This problem is distinguished by complexity and large dimension. The objective function and constraints are nonlinear, so it is proposed to use the methods of decomposition and nonlinear programming (Umbetov, 2016c: 147–149).

Implementation of hierarchical management of a large production complex involves:

- Substantiation of the existence of an optimal state, or coordination conditions;
- Development of algorithms for finding the optimal state and ensuring high efficiency and convergence speed (Umbetov, 2016c: 147–149).

When building complex automated systems with the Tracemode software environment, the above algorithms are used to develop flexible, decentralized systems (Umbetov, 2013: 85–89; Morokina, 2016b: 101–103). Features of optimal control of complex technical complexes include:

- High complexity due to many variables and relationships;
- Natural division into subsystems, each with a local control problem;
- Iterative hierarchical management through information exchange;
- Decomposition of the original control problem into interrelated local problems;
- Coordination procedures interpreted as finding optimal global solutions (Morokina, 2014: 398–400).

Computer-aided design problems can be solved in Tracemode6, integrating components of measuring systems, programming projects, and production management modules (economic, personnel, etc.) (Umbetov, 2015: 273–275). The FBD language and other programming languages in TRACE MODE (Techno SFC, Techno LD, Techno FBD, Techno ST, Techno IL) allow creating mathematical models for educational and industrial purposes (Umbetov, 2013: 85–89; Umbetov, 2019: 218–221).

Modules such as EAM – management of fixed assets, maintenance, and repairs in T-FACTORY 6 enable creation of control programs considering downtime and operational features of equipment (Morokina, 2016a: 140–141). Remote access and mobile devices further allow project management and process monitoring.

Results and discussion.

When building complex automated systems using the Tracemode software environment, it is necessary to take into account the developed algorithms for constructing flexible decentralized systems. The main conclusions regarding the features of optimal control of production facilities in the category of complex technical complexes can be summarized as follows:

High complexity of control problems: These systems involve a large number of variables and numerous functional relationships, making it difficult to apply traditional centralized management methods and necessitating hierarchical management systems.

Natural division into subsystems: The system can be divided into components or subsystems, each controlled by an autonomous system that solves local control problems. The overall control system thus has a multilevel hierarchical structure, with local control systems coordinated by a central management body at the highest level.

Iterative hierarchical management: Hierarchical management is implemented as an iterative, typically multi-step procedure of information exchange. Each subsystem solves its own control problems while the values of coordinating parameters are selected based on a global optimization strategy that considers system-wide constraints (Shukaev, 2013: 90–92).

Decomposition of control problems: Building hierarchical control systems requires decomposing the original global control problem into interrelated local problems. The joint

solution of these local problems determines the solution of the original global problem. The choice of parameters and coordination method depends on the decomposition approach

Coordination as global optimization: The procedure for coordinating local problems can be interpreted as finding the optimal solution for the global management problem, achieved through equilibrium solutions derived from joint solutions to all local problems at each coordination step.

The solution of production problems with decentralization is implemented in the Tracemode6 software environment. For example, the creation of computer-aided design and control systems that integrate individual components of a measuring system is possible using the domestic Tracemode environment, which is rapidly developing and widely used in industry (Umbetov, 2015: 273–275; Morokina, 2016b: 101–103). In addition to programming projects and data broadcasting via information transmission, Tracemode6 allows the creation of separate production management modules addressing economic issues, personnel management, and other aspects (Figure 2).

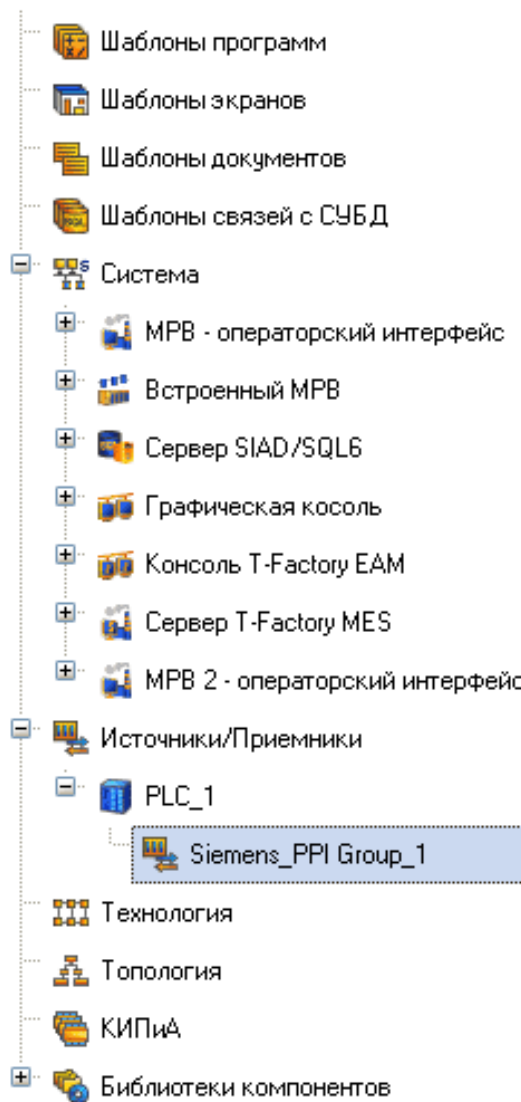


Fig. 2. Menu of production management modules taking into account economic, personnel issues, etc.

The FBD (Function Block Diagram) programming language within Tracemode allows users to program mathematical functions visually, as introduced in laboratory works for disciplines such as “Basic Design of Devices and Systems” and “Fundamentals of Product Design” for instrument-making students (Umbetov, 2013: 85–89). The system supports five modern

programming languages—Techno SFC, Techno LD, Techno FBD, Techno ST, and Techno IL—providing extensive demonstration material for both technical (instrumentation) and economic disciplines, as well as for production control and management (Figure 3).

Program templates and system components include:

- Program templates
- Screen templates
- Document templates
- Database connection templates
- System operator interfaces (MRV, built-in MRV, MRV2)
- SIAD/SQL6 server
- Graphical console
- T-Factory EAM console
- Sources/Receivers (PLC_1, Siemens PPI Group_1)
- Technology, Topology, Instrumentation, Component library

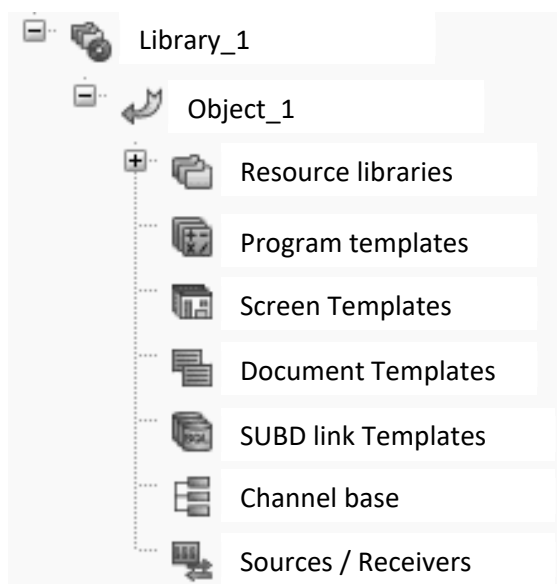
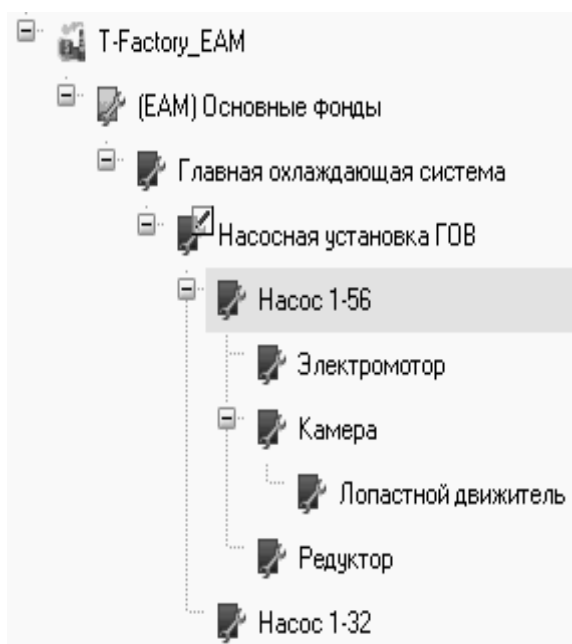


Fig. 3. Basic program templates for building a measuring system

For example, Modules such as EAM – management of fixed assets, maintenance, and repairs in T-FACTORY 6 allow creation of control program fragments that account for equipment downtime, repairs, and operational features of production resources (Umbetov, 2019: 218–221).

When creating computer-aided design and control systems, building control devices for various purposes, which allow using the created analog instrument on the PC monitor as a recording device, the measured parameter is specified in the “text” column. When creating a node in the project, an auto building procedure is used, a group of sources / receivers is created, and a signal generator is selected: a saw, a sinusoid, a random number, etc. (Umbetov, 2019: 218–221). Trend placement and data processing is the next stage, illustrating the operation of the newly created device and the possibility of Trace mode. DDE protocol communication with MS Windows using the example of Excel, as well as connecting a real external input signal module, allows to create a control system based on software such as the Trace mode 6 integrated software environment (Figure 4). For the development and demonstration of the transfer of data on the technological process from the production site to a remote point, it is possible to use the TM6 with the developed modules in the TRACE MODE software environment.



T-Factory
 (EAM) Fixed assets
 Main cooling system
 Pump installation GOV
 Pump 1-56
 Electric motor
 Cell
 Blade propeller
 Gearbox
 Pump 1-32

Fig. 4. Module - Process control of the pump section.

Using a cell phone allows not only the control of technological processes but also the creation of projects with remote access. The presence of well-equipped computer classes at the University of Mines enables students to be trained in this management-design technology from the early years of their studies. In addition to creating their own projects, students can use embedded libraries containing ready-made fragments of technological processes (Umbetov, 2019: 218–221). The integration of this software environment into the educational process facilitates research activities for undergraduates and allows students from other universities, both domestically and internationally, to participate via the Internet. Moreover, the use of video cameras and presentations enables the development of training programs for advanced students, the conduct of international webinars and seminars remotely (Umbetov, 2019: 218–221), and the delivery of online lectures and practical computer classes.

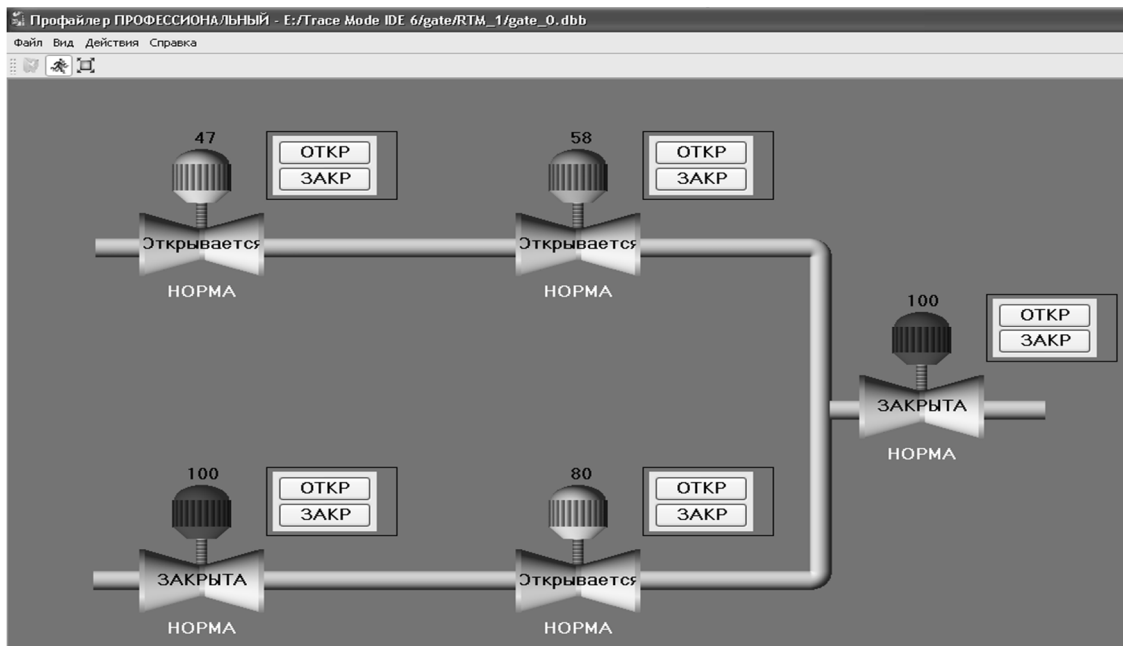


Figure 5. Programming the gate valve in the TraceMode project

Conclusion.

The analysis of the problem of designing and controlling complex technical systems (CTS) demonstrates that the development of flexible, decentralized control structures is essential for the efficient operation of modern production facilities. The fundamental challenge in managing such systems lies in the high complexity of control problems, which arises from the large number of variables and the intricate interrelationships between them. Traditional centralized control approaches often fail to address these challenges due to computational limitations and the difficulty of managing numerous functional dependencies simultaneously. As a result, hierarchical and decentralized control systems have become increasingly important in industrial automation and production management.

Hierarchical management allows a natural decomposition of the system into subsystems, each of which can operate autonomously while being coordinated by a central body at the highest level. This multi-level structure ensures that local control problems are solved iteratively, with continuous exchange of information between subsystems and the central management unit. The approach facilitates the selection of optimal operating parameters and the coordination of local tasks, ultimately leading to the global optimization of system performance. By decomposing the original control problem into a set of interrelated local problems, it is possible to simplify the computational complexity and achieve suboptimal yet practically effective solutions. Such decomposition is particularly advantageous for large-scale systems, as it enables stable convergence toward the global optimum while reducing the computational load associated with full enumeration or centralized optimization methods.

The integration of the TRACE MODE software environment into both industrial and educational contexts has shown significant practical benefits. In production facilities, Tracemode allows the creation of modular control systems that integrate individual measuring components, manage fixed assets, monitor maintenance schedules, and optimize production processes. The software's support for multiple programming languages (Techno FBD, Techno LD, Techno ST, Techno IL, and Techno SFC) provides a versatile platform for modeling complex systems using visual programming blocks. These tools facilitate rapid development, simulation, and testing of control strategies, while ensuring that the software remains adaptable to changing technological and operational conditions. The modular architecture also allows the implementation of parametric optimization and decentralized decision-making, ensuring that the system can respond dynamically to changes in production demands or technological factors.

From an educational perspective, the use of Tracemode in universities provides students with hands-on experience in modeling, designing, and controlling complex automated systems. Well-equipped computer laboratories, access to embedded libraries of pre-configured modules, and the ability to create projects remotely using mobile devices or Internet connections foster research-oriented learning. Students gain the opportunity to experiment with real-time data acquisition, signal generation, and process control, thus bridging the gap between theoretical knowledge and practical application. Moreover, the software supports remote training through webinars, online lectures, and interactive seminars, enabling collaboration across universities and international programs. This approach not only enhances the technical competencies of students but also prepares them to participate in research projects and industry applications at an early stage of their education.

In conclusion, the combination of hierarchical control principles, decentralized optimization, and the Tracemode software environment constitutes a robust framework for managing complex technical systems. This approach allows the efficient resolution of high-dimensional, nonlinear optimization problems, ensures adaptability to changing operational conditions, and facilitates both practical industrial applications and advanced educational programs. The development of flexible control architectures, supported by modular software tools and modern programming environments, represents a crucial step toward the automation of production processes, the enhancement of system reliability, and the preparation of future specialists capable of implementing and managing sophisticated technological systems. As industrial and educational demands evolve, the continued refinement of such methodologies and tools will remain essential for achieving optimal performance, fostering innovation, and maintaining competitiveness in increasingly complex technological environments.

REFERENCE

Mailybaev, 2019 – Mailybaev E.K., Umbetov U.U., Morokina G.S., Isaykin D.V. (2019). Komp'yuternoe proektirovanie detsentralizovannykh sistem v programme Trace Mode [Computer-aided design of decentralized systems in the Trace Mode program] // Traektoriya nauchno-tehnologicheskogo razvitiya Rossii s uchetom global'nykh trendov: sbornik nauchnykh trudov po materialam Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Belgorod, 29 noyabrya 2019 goda / Pod obshch. red. E.P. Tkachevoi. — Belgorod: Obshchestvo s ogranichennoy otvetstvennost'yu "Agentstvo perspektivnykh

Morokina, 2016a — Morokina G. S., Umbetov U. Primenenie Trace Mode 6 v neftegazovoy promyshlennosti. — Sbornik nauchnykh trudov III Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. — SPb. — 2016. — Pp. 140–141. [Russ.]

Morokina, 2016b — Morokina G. S., Umbetov U. Upravlenie tekhnologicheskimi processom s primeneniem programmnoy srede Trace Mode. — Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. — SPb. — 2016. — Vol. 3. — Pp. 101–103. [Russ.]

Umbetov, 2013 — Umbetov U., Hu Ven-Cen, Imanova U. Zh. Dekompozitsiya dinamicheskikh zadach upravleniya. — Zhurnal RAE. Sovremennyye naukoymkie tekhnologii. Tekhnicheskie nauki. — 2013. — №5. — Pp. 85–89. [Russ.]

Umbetov, 2016c — Umbetov U., Hun-Ven Cen, Morokina G. S. Decentralizatsiya v gibkikh sistemah avtomatizirovannogo upravleniya. — Sbornik trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. — SPb. — 2016. — Vol. 4. — Pp. 147–149. [Russ.]

Umbetov, 2015 — Umbetov U., Morokina G. S. Osobennosti postroeniya avtomatizirovannykh sistem dlya upravleniya slozhnyimi tekhnologicheskimi kompleksami. — Sbornik trudov IX SPb kongressa «Professional'noe obrazovanie, nauka i innovatsii v XXI veke». — 2015. — Pp. 273–275. [Russ.]

Umbetov, 2019 – Umbetov, U.U., Morokina, G.S., Tishchenko, Yu. A. (2019). Innovatsionnye tekhnologii postroeniya upravlyayushchikh avtomatizirovannykh sistem dlya tekhnologicheskikh protsessov [Innovative technologies for building automated control systems for technological processes]. // Modelirovanie i situatsionnoe upravlenie kachestvom slozhnykh sistem: Sbornik dokladov Nauchnoy sessii GUAP, Sankt-Peterburg, 08–12 aprelya 2019 goda. — Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. — 2019. — Pp. 218–221. [Russ.]

Morokina, 2019 — Morokina G., Umbetov U., Mailybayev Ye. Computer-Aided Design Systems of Decentralization on Basis of Trace Mode in Industry. // 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). — 2019. — Pp. 1–5.

Jose, 2015 — Jose C. I. O., Cortez L., Gregorio T. G., Miguel L. Instrumentation and Automation of Mechatronic. — Journal of Engineering Research and Applications. — 2015. — Vol. 5. — Issue 12. — Pp. 48–52. [Eng.]

Shukaev, 2013 — Shukaev D.N., Umbetov U.U., Bekseitova A.B. (2013). Postroenie optimal'nogo SHTK s gibkoy perestrayivaemoy strukturoy [Construction of an optimal flexible reconfigurable SHTK] // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. —2013. — №5. — Pp. 90–92. [Russ.]

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 22. Is. 2. Number 86 (2025). Pp. 90–104
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.008>
UDC 24174

COMPUTER SUPPORT FOR RESPONDING TO RAILWAY EMERGENCIES

*M. Shalabayeva**

College of International Engineering and Technological University, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: lgnktsm@mail.ru

Mayra Shalabayeva — head of College, College of International Engineering and Technological University, Almaty, Kazakhstan
E-mail: lgnktsm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0420-6415>.

© M. Shalabayeva

Abstract. This study focuses on the automation of decision-making in analyzing emergency situations on railway transport involving the carriage of dangerous goods (DG). The relevance of the research is determined by the growing volume of DG transportation and the high likelihood of accidents, which can have serious consequences for the environment, economy, and public safety. The main objective of the study is to develop mathematical models that provide the basis for an intelligent decision support system (DSS) for the localization of accidents and minimizing their consequences. The tasks of the study include analyzing existing models and software for predicting pollutant dispersion, formalizing the DG transportation system as a directed graph of states, developing mathematical models for the probability of safe railway operation and estimating the duration of accident elimination, and studying the impact of organizational and technological measures on the efficiency of emergency response units. As a result, models were developed that allow forecasting the development of emergency situations, assessing the required resources for accident response, determining optimal deployment and concentration times for response units, and considering the influence of DG properties and external conditions on the incident dynamics. Statistical analysis of railway accidents involving DG in EU countries over the past decade revealed a dependency of accident numbers on cargo traffic. The mathematical models were implemented in a software prototype to evaluate the duration of liquidation operations and potential environmental and economic consequences. The study concludes that the application of the developed models and DSS increases the objectivity of decision-making, reduces delays in emergency response, and contributes to minimizing environmental damage. Future work includes expanding DSS functionality, integrating data from unmanned aerial vehicles and other sensors, and applying models for real-time planning of emergency operations.

Keywords: dangerous goods, railway transport, emergency situations, decision support system, environmental safety, mathematical modeling, accident mitigation.

For citation: M. Shalabayeva. Computer support for responding to railway emergencies // Industrial Transport of Kazakhstan. 2025. Vol. 22. No. 86. Pp. 90–104. (In Eng.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.008>

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

ТЕМІРЖОЛ КӨЛІГІНДЕГІ ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙЛАРҒА ДЕН ҚОЮДЫ
КОМПЬЮТЕРЛІК ҚОЛДАУ

*М. Шалабаева**

Халықаралық инженерлік-технологиялық университетінің колледжі, Алматы, Қазақстан.
E-mail: lgnktsm@mail.ru

Майра Шалабаева — колледж директоры, Халықаралық инженерлік-технологиялық университетінің колледжі, Алматы, Қазақстан
E-mail: lgnktsm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0420-6415>

© М. Шалабаева

Аннотация. Бұл жұмыста қауіпті жүк тасымалы кезінде теміржол көлігінде туындайтын төтенше жағдайларды талдау кезінде шешім қабылдауды автоматтандыру мәселелері қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі – қауіпті жүк тасымалы көлемінің артуы және апаттардың жоғары ықтималдығы, олардың қоршаған ортаға, экономикаға және халық қауіпсіздігіне елеулі әсер етуі мүмкіндігімен анықталады. Зерттеудің негізгі мақсаты – төтенше жағдайларды локализациялау және салдарын азайту үшін шешім қабылдауды қолдайтын интеллектуалды жүйені (ШҚҚЖ) құру негізін қамтамасыз ететін математикалық модельдерді әзірлеу. Зерттеу барысында қойылған міндеттер: ластануды болжауға арналған қолданыстағы модельдер мен бағдарламалық қамтамасыз етуді талдау; қауіпті жүк тасымалы жүйесін бағытталған граф түрінде формализациялау; теміржол инфрақұрылымының қауіпсіз жұмыс істеу ықтималдығын және апат салдарын жою ұзақтығын бағалауға арналған математикалық модельдер әзірлеу; ұйымдастырушылық және технологиялық шаралардың авариялық қызметтердің тиімділігіне әсерін зерттеу. Нәтижесінде төтенше жағдайлардың дамуын болжауға, апаттарды жоюға қажетті күш-құралдарды бағалауға, қызметтерді оңтайлы орналастыру және шоғырландыру уақытын анықтауға, сондай-ақ қауіпті жүктің қасиеттері мен сыртқы жағдайлардың оқиға дамуына әсерін ескеруге мүмкіндік беретін модельдер әзірленді. Соңғы онжылдықтағы ЕО елдеріндегі қауіпті жүк тасымалы кезінде болған теміржол апаттарының статистикалық талдауы апаттар санын жүк ағынымен байланыстыруға мүмкіндік берді. Математикалық модельдер апатты жою жұмыстарының ұзақтығын және экологиялық және экономикалық салдарын бағалау үшін бағдарламалық прототипке енгізілді. Зерттеу қорытындысы әзірленген модельдер мен ШҚҚЖ қолданылуы шешім қабылдаудың объективтілігін арттыратынын, апатты жоюдағы уақыт шығынын азайтатынын және қоршаған ортаға келетін зиянды азайтатынын көрсетеді. Болашақтағы жұмыстарға ШҚҚЖ функционалын кеңейту, ұшпайтын аппараттар мен басқа сенсорлық жүйелерден алынған деректерді біріктіру және модельдерді нақты уақыт режимінде авариялық іс-қимылды жоспарлауға қолдану кіреді.

Түйін сөздер: қауіпті жүк, теміржол көлігі, төтенше жағдайлар, шешім қабылдауды қолдау жүйесі, экологиялық қауіпсіздік, математикалық модельдеу, апат салдарын жою

Дәйексөздер үшін: М. Шалабаева. Теміржол көлігі диспетчерінің автоматтандырылған жүйесінде деректерді қатар өңдеу // Қазақстан өндіріс көлігі. 2025. Том. 22. № 86. 90–104 бет. (Ағыл. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.008>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

КОМПЬЮТЕРНАЯ ПОДДЕРЖКА РЕАГИРОВАНИЯ НА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ

*М. Шалабаева**

Колледж Международного инженерно-технологического университета, Алматы, Казахстан.



E-mail: lgnktsm@mail.ru

Майра Шалабаева — директор колледжа, колледж Международного инженерно-технологического университета, Алматы, Казахстан
E-mail: lgnktsm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0420-6415>.

© М. Шалабаева

Аннотация. В данной работе рассматриваются вопросы автоматизации принятия решений при анализе чрезвычайных ситуаций на железнодорожном транспорте, сопровождающихся перевозкой опасных грузов (ОГ). Актуальность исследования обусловлена увеличением объёмов перевозки ОГ и высокой вероятностью аварий, которые могут иметь серьёзные последствия для окружающей среды, экономики и безопасности населения. Основная цель работы заключается в разработке математических моделей, обеспечивающих создание интеллектуальной системы поддержки принятия решений (СППР) для локализации аварий и минимизации их последствий. В рамках исследования поставлены следующие задачи: анализ существующих моделей и программного обеспечения для прогнозирования распространения загрязняющих веществ; формализация системы перевозки ОГ в виде ориентированного графа состояний; разработка математических моделей вероятности безопасного функционирования железнодорожной инфраструктуры и оценки времени ликвидации последствий аварий; исследование влияния организационных и технологических мер на эффективность действий аварийных служб. В результате работы разработаны модели, позволяющие прогнозировать развитие чрезвычайной ситуации, оценивать потребности в силах и средствах для ликвидации аварий, определять оптимальное время их концентрации и действия, а также учитывать влияние свойств опасных грузов и внешних условий на скорость развития инцидента. Проведён анализ статистики железнодорожных аварий с участием ОГ в странах ЕС за последние десять лет, что позволило определить зависимость числа аварий от грузопотока. Математические модели были внедрены в прототип программного обеспечения, позволяющего оценивать продолжительность ликвидационных работ и возможные экологические и экономические последствия. Заключение исследования подтверждает, что применение разработанных моделей и СППР повышает объективность принятия решений, снижает временные потери при ликвидации аварий и способствует минимизации ущерба окружающей среде. Перспективы дальнейшей работы включают расширение функционала СППР, интеграцию данных с беспилотных летательных аппаратов и других сенсорных систем, а также использование моделей для планирования аварийных действий в режиме реального времени.

Ключевые слова: опасные грузы, железнодорожный транспорт, чрезвычайные ситуации, система поддержки принятия решений, экологическая безопасность, математическое моделирование, ликвидация последствий.

Для цитирования: М. Шалабаева. Компьютерная поддержка реагирования на чрезвычайные ситуации на железнодорожном транспорте // Помышленный транспорт Казахстана. 2025. Т. 22. No. 86. Стр. 90–104. (На англ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2025.86.02.008>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Introduction.

The study of railway emergencies (RWE) involving dangerous goods (DG) has become increasingly important due to the growing volume and complexity of freight transportation worldwide. Accidents during the transportation of DG can lead to catastrophic consequences,



including loss of human life, environmental contamination, destruction of cargo and railway infrastructure, and significant economic losses (Batarlienė, 2014: 395–400). Despite previous research on railway safety and environmental protection (Abuova, 2019: 234–249; Hooghiemstra, 1999: 15–32), there remain unresolved challenges in providing timely, informed, and coordinated decision-making under conditions of incomplete or rapidly changing information. This gap highlights the need for advanced decision support systems (DSS) integrated with predictive mathematical models to enhance emergency response efficiency.

The rationale for this study is based on the increasing threat posed by RWE with DG and the complexity of managing their consequences. Traditional emergency management approaches often fail to account for the dynamic interplay between technological, organizational, and environmental factors. The relevance of this research is further emphasized by the absence of comprehensive methods that integrate real-time environmental data, predictive modeling, and operational planning for railway networks transporting DG (Katsman, 2015: 28–39; Kornaszewski, 2017: 282–292). The study addresses both theoretical and practical aspects of emergency management, aiming to improve the safety and reliability of railway transport systems while minimizing environmental risks.

The object of this research is the system of railway transportation of dangerous goods and its operational reliability during emergencies. The subject of the study is the process of managing railway emergencies involving DG, including the assessment, localization, and elimination of consequences, with a particular focus on environmental protection, cargo safety, and operational recovery.

The aim of this study is to develop mathematical models and decision support tools to enhance the efficiency of emergency response in railway transport systems during DG transportation. To achieve this aim, the following objectives are set:

- To formalize the DG railway transportation system as an oriented graph of safe functioning states (Shalabayeva, 2024: 1–2), incorporating emergency occurrence, assessment, localization, and elimination;
- To develop predictive models for the duration and scope of liquidation works necessary to mitigate RWE consequences;
- To integrate environmental, technological, and organizational factors into DSS to optimize the allocation of resources and improve operational efficiency;
- To provide a framework for practical implementation of software tools that support situational analysis, risk assessment, and informed decision-making at RWE sites.

This study employs a combination of mathematical modeling, simulation, and system analysis. Predictive models for RWE development and environmental impact are incorporated into the computational core of DSS. The research also uses statistical analysis of historical RWE data, GIS-based environmental monitoring, and scenario-based simulation to optimize decision-making processes.

The central hypothesis of this study is that the integration of predictive mathematical models into a DSS will significantly enhance the effectiveness of emergency response operations in railway transport systems transporting DG. Specifically, timely, informed decision-making supported by automated analysis of environmental and operational data can reduce the duration and severity of RWE consequences, minimize environmental damage, and improve system reliability.

The significance of this research lies in its potential to advance both theoretical knowledge and practical applications in the fields of railway safety, environmental protection, and emergency management. The proposed models and DSS framework provide a scientific basis for improving operational planning, resource allocation, and risk mitigation in railway networks transporting hazardous cargo. Ultimately, this research contributes to safer and more sustainable railway transport operations, supporting the broader goals of environmental safety and public health protection.

Materials and methods.

In works (Abuova, 2019: 234–249; Batarlienè, 2014: 395–400; Hooghiemstra, 1999: 15–32; Dindar, 2019: 203–216), it is shown that the use of intelligent decision support systems (DSS) will allow the head of the emergency operations center to carry out informational, technological, analytical, and organizational support of the iterative process of analyzing the situation that has developed on the site of RWE, preparing and evaluating decision options, and the choice of the final decision on the localization of the RWE and the elimination of their consequences, which is impossible without the appropriate mathematical models (Akhmetov, 2021: 80–90).

In works (Katsman, 2011: 86–93; Katsman, 2013: 72–85; Katsman, 2015: 28–39), it is shown that the reliability of railway transport (RWT) when transporting passengers and goods should be understood as its ability to ensure the timely and safe delivery of passengers and goods to their destination without deterioration of the health of passengers and the commercial quality of goods due to RWT (Akhmetov, 2021: 80–90).

An essential component of reliability is the safety of the railway transport system (RTS), which is focused on reducing the impact of hazardous factors of the RWE on human health, transport work, and Env. The solution to this problem is achieved through coordinated actions of liquidation units, designed to localize the RWE and eliminate their consequences (Akhmetov, 2021: 80–90; Katsman, 2015: 28–39; Abuova, 2019: 234–249; Kornaszewski, 2017: 282–292).

Particular attention should be paid to the transportation of DG, including those that pose a threat to the pollution of Env. This category includes cargoes with various physical, chemical, and fire-explosive properties. Emergencies with such cargoes are accompanied by the impact of hazardous factors harmful to people, Env., cargo and RWT facilities, and other ministries and departments of the country (Torretta, 2017: 1–9; Gheorghe, 2005: 247–272; Khanmohamadi, 2018: 230–241). Such situations include explosions, fires, scattering of solid cargo, spreading of liquid cargo, and emissions into the atmosphere of hazardous gaseous substances transported by RWT.

In other words, the reliability of RWT during the transportation of DG can be interpreted as its ability to restore its safe functioning during specific periods with a given probability after the RWE, accompanied by the action of hazardous factors harmful to people, Env., cargo and RWT (Nowacki, 2016: 21–29; Schröder, 2016: 322–334).

Many scientific works are devoted to studying the problems of safety and reliability of such transportation (Zelenko, 2019: 03011; Dvorak, 2020: 5494; Huang, 2020: 1–33).

However, many problematic issues related to computer support for decision-making on assessing the situation at the site of RWE and the development of control actions for eliminating the consequences of the accident have not been fully disclosed. It is this fact that determines the relevance of our study.

Practical software implementation of mathematical models in predicting environmental consequences is a complex technical problem that is designed for a specific area (transport, industry, etc.) and takes into account various factors. For example, it is rather challenging to consider changes in the dynamics of turbulent flows or factors of heat transfer, dust-containing fractions. Even more sophisticated models describe the scenarios of the response of various components of Env. to gaseous pollution, taking into account the transfer of solar and diffuse radiation (Knapcikova, 2018: 71–77).

Figure 1 shows the software implementation (Software, hereinafter referred to as SW) AERMOD (Canada, USA). This SW is intended for calculations and modeling of the atmosphere near large stationary industrial sources of pollution. Data within a radius of up to 50 km from the source are taken into account.

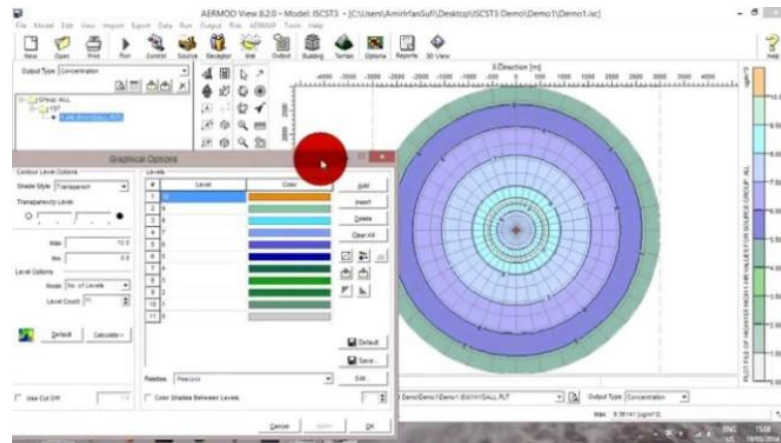


Fig. 1. General view of the AERMOD software package for automated assessment of atmospheric dispersion

The models embedded in the AERMOD SW make it possible to build predictive estimates for continuous emissions floating at different levels from the earth's surface, taking into account the dispersion of emissions (Knapcikova, 2018: 71–77). In the model, the concentration of pollutants does not affect the discharged flow. When simulated, turbulent flows are linear. However, there are limitations under which it is assumed that the average lateral speed and vertical wind speed are equal to zero. The model receives meteorological data from probes located at different altitudes. AERMOD SW allows us to create profiles of temperatures, winds, turbulences and considers factors associated with dry and wet deposition of pollutants (Abuova, 2019: 234–249).

Results and discussions.

The model and the corresponding ADMS-5 SW are modern means for calculating the concentrations of pollutants that can enter Env. from both point sources and mobile air pollutants see Fig. 2 (Zelenko, 2019: 03011).

The model and ADMS-5 SW contain algorithms that allow for many factors, including the complexity of the terrain; wet deposition of pollutants; short-term fluctuations in pollutant concentrations; chemical reactions inherent to various pollutants when external temperatures and humidity change; factors of radioactive decay and gamma doses, etc.

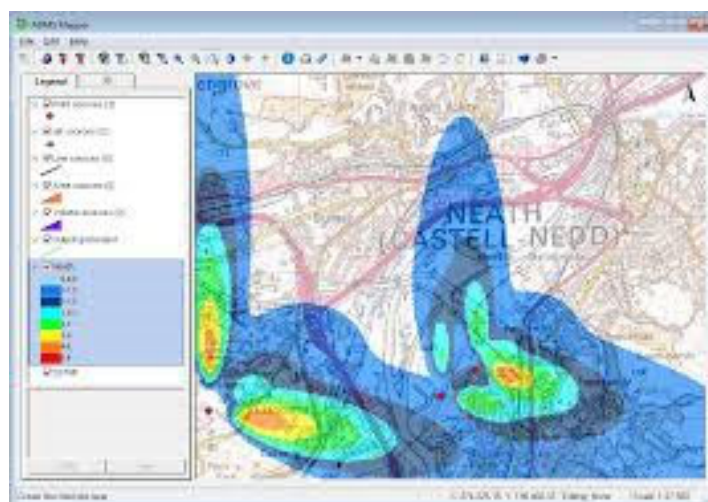


Fig. 2. General view of the software interfaces of the ADMS-5 complex

Techniques and corresponding SW "TOXI", "TOXI +", "TOXI + Risk" (Huang, 2020: 1–33), and ALOHA allow us to calculate the characteristics of hazardous substances cloud that moves in the atmosphere. The SW algorithms are based on the integral laws of conservation of mass and energy of pollutants (Torretta, 2017: 1–9).

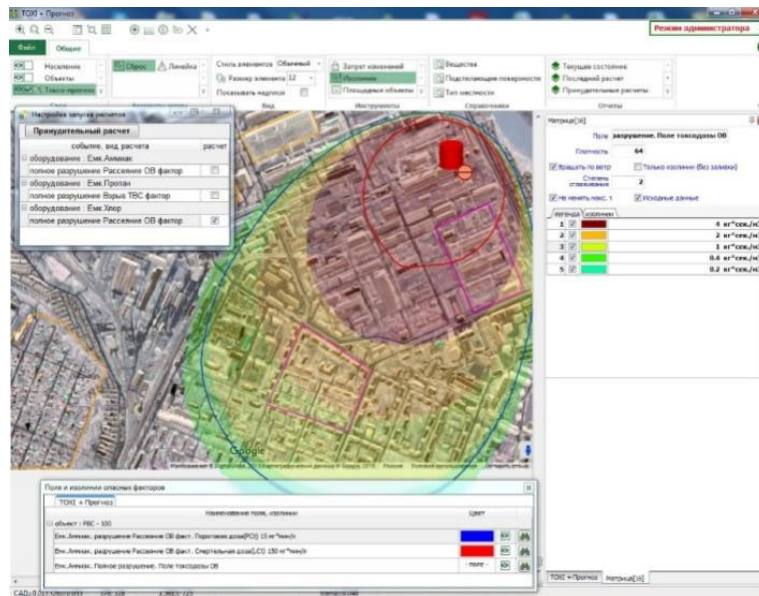


Fig. 3. General view of the software interfaces of the "TOXI" complex

Based on the above analysis and a brief overview of SW for modeling environmental emergencies, it can be concluded that there are many diverse models for calculating the dispersion of hazardous emissions. This list includes both simple Gaussian models and models that have become the basis for algorithms and SW for detailed calculations of complex gas-dynamic parameters of the movement of pollutants in Env (Dvorak, 2020: 5494).

The paper aims to develop mathematical models for the decision support system's computing core in response to accidents on railway transport, accompanied by a threat to environmental pollution (Batarlienè, 2014: 395–400).

Elimination of the consequences of railway emergencies with DG consists of interrelated processes that require a set of measures aimed at preventing threats to people, protecting the natural environment, ensuring the safety of cargo, RS, railway infrastructure facilities, restoring train traffic and shunting operations as soon as possible (Khanmohamadi, 2018: 230–241). At the same time, the rational use of a variety of resources required to carry out these activities is also important. So, the balanced timing of the restoration of train traffic (the operability of the transport system) and the resources required for this are the criteria for the effectiveness of the system for eliminating the consequences of railway emergency situations during the transportation of DG (Shalabayeva, 2020: 226–231; Gheorghe, 2005: 247–272).

To automate many works at the site of railway accidents and assess the operational situation, several researchers, including domestic ones, propose using the potential of automated information systems and DSS (Hooghiemstra, 1999: 15–32; Dindar, 2019: 203–216). It is necessary to have tools for processing a large amount of information about the nature of the accident and the ecological situation at the worksite in the area of elimination of the consequences of major accidents at RWT, which can potentially be accompanied by the emergence of threats and risks for Env. Moreover, the amount of such information may tend to grow exponentially as the situation develops, as, for example, happened during the catastrophe in Canada. It is necessary to minimize the consequences of environmental accidents on RWT in conditions when information flows are rapidly growing and liquidators are faced with a lack of time (Shalabayeva, 2020: 226–231).

The question arises about the need to create well-built computerized systems for automated operational information support for analyzing the situation at the RWT accident scene (Katsman, 2015: 28–39). Such systems are multifunctional and should, among other things, include the following functional modules (Shalabayeva, 2020: 226–231):

- a module for automated assessment of environmental safety in the elimination of the consequences of accidents at RWT;
- a module for the development and decision-making on responding to the threats to Env.;
- a module for assessing the risks for Env. They may arise as a result of the unfavorable development of scenarios of the accident consequences during the transportation of DS by RWT (Schröder, 2016: 322–334);
- other modules.

Using the data obtained from the tools for measuring contamination of Env. components directly at the accident site (data on the state of air, soil, water sources, etc.), it is possible, through DSS or information systems, not only to simulate different scenarios for the development of the situation at the accident site but also to obtain preliminary assessments of risks and consequences, if the development of the scenario of Env. pollution moves according to the pessimistic scenario ((Shalabayeva, 2020: 226–231; Nowacki, 2016: 21–29).

Studies by many authors in the field of environmental safety in transport show that the development of automated and intellectualized systems for assessing ecological safety in eliminating accident consequences at RWT can give a new impetus to the implementation of such systems in practice (Kornaszewski, 2017: 282–292). This is, in particular, necessary to increase the objectivity of assessments and reduce the time deficit in the process of liquidation work at the scene of accidents at RWT transporting DG (Shalabayeva, 2020: 226–231), which can lead to damage for the Env.

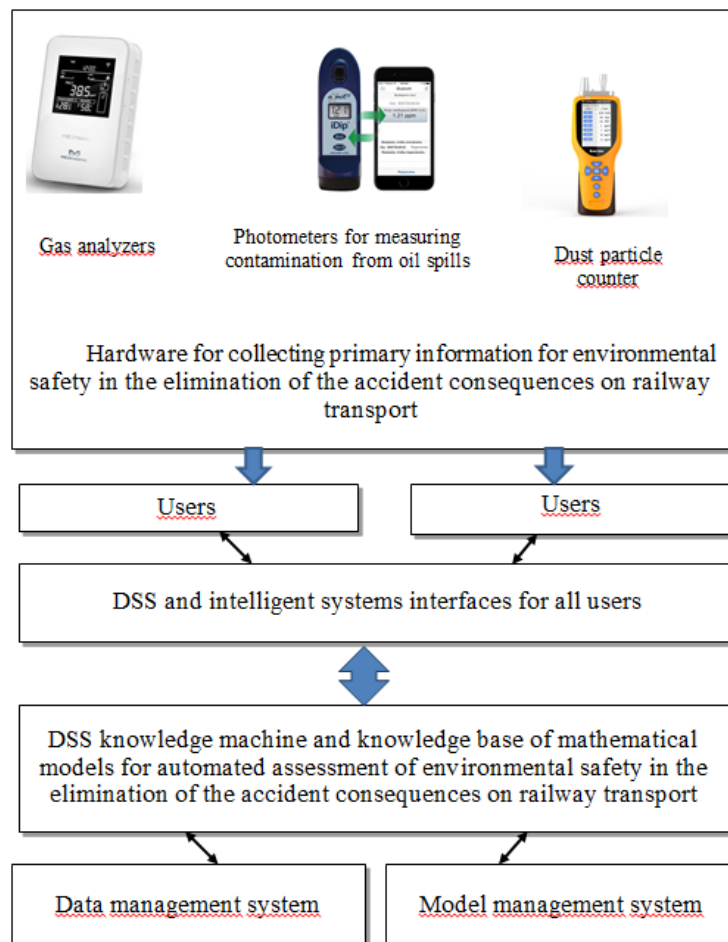


Fig. 4. Basic architecture of a computerized decision support system with modules for automated assessment of environmental safety in the elimination of the accidents consequences on railway transport (Akhmetov, 2022: 1287–1300)

In the structure of information and automated systems for managing the ecological state of Env., the main component is a database that provides the system with information and determines its structure, functions, and ability to solve management problems based on modeling the situation ((Akhmetov, 2022: 1287–1300; Knapcikova, 2018: 71–77).

Analysis of the current management scheme for the railway infrastructure's environmental safety indicates its imperfection and the absence in its structure of an organized system for obtaining and analyzing data for the timely adoption of managerial decisions on rational ecological management and minimizing the negative impact on the Env. (Akhmetov, 2022: 1287–1300).

At the output, the DSS will provide information containing the assessment of Env's state for the investigated territories at the accident site. Also, the computational core of the DSS includes models that allow making predictions about the health status of the population in the accident zone and assessing the situation from an economic point of view and the consequences for Env. The information obtained can be used by various management structures. For example, such information will be useful in the process of developing measures to eliminate the consequences of accidents and to allocate funds for restoring the Env. to its original state (Akhmetov, 2022: 1287–1300; Abuova, 2019: 234–249).

The models used in the computational core of such a DSS reflect an emergency situation associated with a DG leak (for example, a spill of contents from a railway tank car), and the response to such a situation by the units in charge of RWE localizing and eliminating the consequences, including for Env (Akhmetov, 2022: 1287–1300; Torretta, 2017: 1–9).

A refusal in the RIS safe operation should be understood as any transport accident due to which RWE with the participation of DG may occur (Dvorak , 2020: 5494). Analysis of the statistics of DG freight traffic on the railways of the EU countries over the past ten years made it possible to establish that the number of such RWE with DG participation depends on the total tonnage of all cargo transported by RWT, which is shown in Fig. 5.

The data shown in Fig. 5 correspond to the generalized statistics for six EU states for the specified period (Germany, France, Italy, Spain, Poland, Romania) (Huang, 2020: 1–33; Torretta, 2017: 1–9). The dependence of the number of traffic accidents with DG on the road's traffic load is undeniable, with an approximation coefficient of about 0.74. Obviously, it is general that it can be attributed not only to a specific EU state but also to any other RWT network.

The dependence $y = f(x)$ shown in Fig. 5 can be presented in a more straightforward form suitable for the calculations required in this model, for example,

$$y = \frac{1}{5} \exp\left\{\frac{1}{4} \cdot x\right\} \quad (1)$$

considering that $0,4822 \approx \frac{1}{2}$, a $0,2428 \approx \frac{1}{4}$.

Taking into account the technological parameters used in the model, the value $y = n_{SF}$, will then be given as:

$$n_{SF} = \frac{1}{2} \exp\left\{-\frac{365 \cdot N \cdot G}{4 \cdot 10^6}\right\}, \quad (2)$$

where N – is the average daily number of trains that travel by rail in both directions;
 G – is average train gross weight, tons.

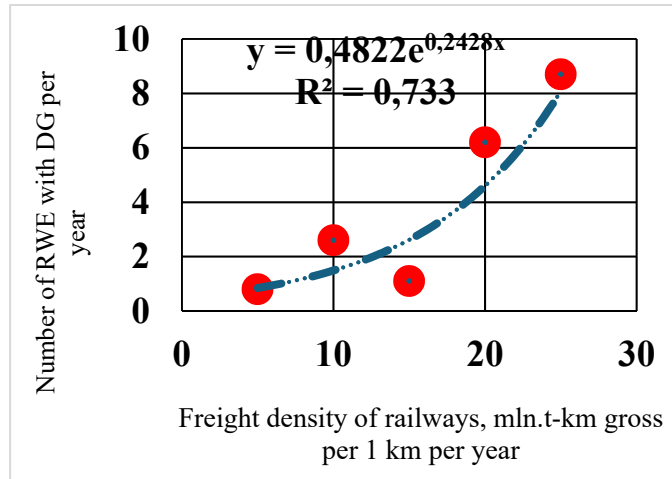


Fig. 5. Trend line for the number of RWE with DG in the EU countries over the past 10 years (data according to [16, 17 (Electronic edition)])

Given the formulas (2) and (3), taking the time $T = 356$ days, we obtain the value of the average duration of the RIS safe functioning state t_{SS} (in days):

$$t_{SS} = \frac{T}{n_{SF}} = 2 \cdot 365 \cdot \exp\left\{-\frac{365 \cdot N \cdot G}{4 \cdot 10^6}\right\}. \quad (3)$$

Now formula (9) can be modified, using in it, if necessary, time (formula (4)):

$$p_1 = \left\{ 1 + \frac{\left\{ \frac{365 \cdot N \cdot G}{4 \cdot 10^6} \right\}}{2 \cdot 365} \cdot \left[\frac{t_{CR} + t_{CF}}{t_{CR} + 2 \cdot t_{CF}} \cdot (t_{CF} + t_{LF}) + t_{DR} \right] \right\}^{-1}, \quad (4)$$

here all parameters are defined above.

It is known from practice that the delay in the arrival of liquidation forces and means and their ineffective use always leads to more severe RWE consequences and more prolonged elimination. Moreover, the most rapidly the RWE develop in a dangerous direction of increasing losses from it just after the start of the process, which cannot be ignored in the corresponding mathematical model. Note that the rapid development of any process in time is well described by exponential dependence. It is this dependence that we will use, taking as a basis the formula (5):

$$t_{DR} = \frac{D_{DR}^{\max}}{\mu_{DR}} \left[1 - \exp\left\{-\frac{t_{CR} + t_{LE}}{t_{CR}}\right\} \right], \quad (5)$$

where D_{DR}^{\max} – is the maximum possible amount of work that needs to be done to eliminate the RWE consequences (for example, removal of the top layer of soil saturated with a hazardous liquid, in tons, cubic meters, or other units of measurement), and μ_{DR} – is the productivity of the forces and means that are involved in eliminating the RWE consequences (in the same units of measurement per unit of time).

We can see from formula (5) that at $t_{CR} \rightarrow 0$, when the total loss of cargo occurs almost instantly (for example, an explosion), the volume of liquidation works tends to the maximum possible (since $\exp\left\{\frac{t_{CR} + t_{LE}}{t_{CR}}\right\} \rightarrow 0$ then $D_{DR} \rightarrow D_{DR}^{\max}$). It can also be seen from formula (5) that for any non-zero positive $t_{CR} > 0$, the longer the concentration time is for the liquidation

forces and means involved in the RWE eliminating, accompanied by a threat to Env., $t_{CR} + t_{LE}$, the greater is the volume of liquidation work ($D_{DR} \rightarrow D_{DR}^{\max}$). Thus, the model adequately takes into account both the rate of undesirable RWE development, which depends on its nature and external conditions, the DG properties (through parameter t_{CR}), and the speed of response to this situation (through $t_{CR} + t_{LE}$) (Dindar, 2019: 203–216).

Regarding formula (4) and the previous formulas containing the value μ_{DR} , it should be noted that this value also depends on many factors, so we will focus on its analysis.

The value of the productivity of liquidation forces and means μ_{DR} is an "integral" value. This value can be represented as follows:

$$\mu_{DR} = \sum_{i=1}^m \mu_i \cdot n_i, \tag{6}$$

where μ_i – is the productivity of the liquidation forces and means of the i – type (for example, such as fire engines, cranes, or bulldozers), and n_i – is the number of units of the liquidation forces and means of the i – type (Abuova, 2019: 234–249). Moreover, the value t_{DR} is also “integral” in the sense that the indicated liquidation forces and means can be used simultaneously to perform various types of work, and these works, depending on the nature of the RWE and the plan for eliminating its consequences, can be completed at different times. Thus, the total duration of liquidation works t_{DR} is determined by the time from the beginning of the "first" (in order) work to the end of the "last" work, and its determination and minimization can be carried out using appropriate mathematical methods (for example, network planning or the PERT method (Knapcikova, 2018: 71–77).

Further attention will be focused on the fact that the earlier and more accurately the assessment of the RWE is made and the managerial decision on the choice of the parameters for the concentration and combat deployment of forces and means in the required quantity is made, the faster the RWE will be localized. And, accordingly, the less severe its consequences will be and the faster they will be eliminated (Hooghiemstra, 1999: 15–32). In terms of the model proposed in the thesis, this means that its mathematical parameters $t_{CF} = t_{SA} + t_{TT} + t_{RS} = t_{SA} + \left(\frac{L}{V}\right) + t_{RS}$, and also μ_{DR} can be optimized by applying appropriate organizational and technological measures (for example, the optimal deployment of liquidation forces and means, their appropriate equipment and rapid concentration) and technical means. For example, it is possible to use UAV and DSS for reconnaissance, assessing the situation and making decisions on the spot of the RWE. Thus, the most effective implementation of measures for the containment and elimination of the RWE can be ensured, and, therefore, the maximum possible reliability of the RTS is ensured when transporting DG that poses a threat to Env.

Let us return to our model, taking into account the previous reasoning. Now we can write such an analytical expression:

$$p_{SS} = p_1 = \frac{1}{1 + \frac{\exp\left\{\frac{365 \cdot N \cdot G}{4 \cdot 10^6}\right\}}{2 \cdot 365 \cdot 24} \left[\frac{t_{CF} + 3 \cdot t_{LE}}{4} + \frac{D_{DR}^{\max}}{\mu_{DR}} \left[1 - \exp\left\{-\frac{t_{CR} + t_{LE}}{t_{CR}}\right\} \right] \right]}. \tag{7}$$

In order to reflect the logic of these considerations, we compose the following equation:

$$t_{CF} = t_{\min} + \frac{t_{CR} - t_{CF}}{t_{CR} - t_{\max}} \cdot (t_{CR} - t_{\max}). \quad (8)$$

Equation (6) reflects the fact that the actual time of concentration of liquidation forces and means is always within certain limits $t_{\min} \leq t_{CF} \leq t_{\max}$, and they try to reduce it in a certain way if $t_{CR} \rightarrow 0$. After transformations of equation (21), we obtain a quadratic equation regarding t_{CF} , the only root of which at $t_{\min} \leq t_{CF} \leq t_{\max}$ will be

$$t_{CF} = t_{CR} + \sqrt{t_{CR}^2 + \left(t_{SA} + \frac{L}{V}\right) \cdot \left(t_{CR} - \left(t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}\right)\right)}. \quad (9)$$

However, if $t_{CR} = 0$, then the minimum value of t_{CF} will be the geometric mean,

$$t_{CF} = \sqrt{\left(t_{SA} + \frac{L}{V}\right) \cdot \left(t_{SA} + \frac{L}{V} + t_{RC}\right)},$$

which is known to be close to the lower value.

This reflects that in practice, in hazardous situations, they try to reduce the concentration time in every possible way. If the "critical time" values are relatively large, that is $t_{CR} \gg 0$, then there is a certain reserve of time for the concentration of forces.

Let us simulate possible scenarios for the development of the situation. In the first variant, the duration of time for assessing the situation and making a decision is taken $t_{SA} = 0,5$ h. In the second variant, this time is taken $t_{SA} = 0,25$ h.

The simulation results are shown in Fig. 6.

Fig. 6 shows that reducing the time for deciding to carry out liquidation works by only 15 minutes leads to a decrease in these works' total duration, on average, from one to almost four hours. Since every hour of delay in the start of response work is associated with a significant loss of cargo, a negative impact on Env., and direct and indirect economic losses, it is obvious the need for an early assessment of the current situation, and the adoption of a timely informed decision to eliminate RWE. This is possible due to the use of the latest technical means of monitoring the development of such a situation, such as the use of UAVs, security cameras, if available nearby, and the use of information technology and intelligent DSS (Abuova, 2019: 234–249).

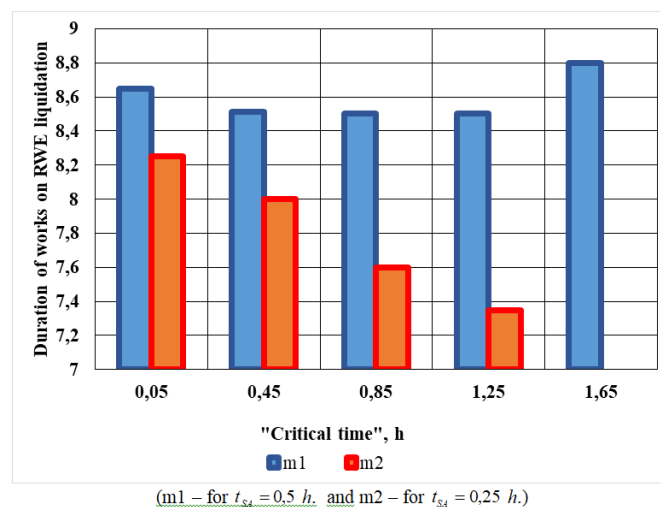


Fig 6. Results of modeling the duration of liquidation works at the RWE site

Considering that a different level of economic indicators characterizes the presence of the DG transportation system (Fig.5) in each of the states (Huang, 2020: 1–33; Torretta, 2017: 1–9), it is advisable, using the proposed mathematical models, to assess the economic effects of maintaining an appropriate level of RIS reliability.

For the assessment and planning of the actions of the liquidation forces at the RWE site, a corresponding DSS was developed, the primary interfaces of which are shown in the article (Abuova, 2019: 234–249).

At the moment, work is underway to implement the models presented in this study in the form of an independent software product to assess the duration of the liquidation work at the RWE site, see Fig. 7 (Zelenko, 2019: 03011).

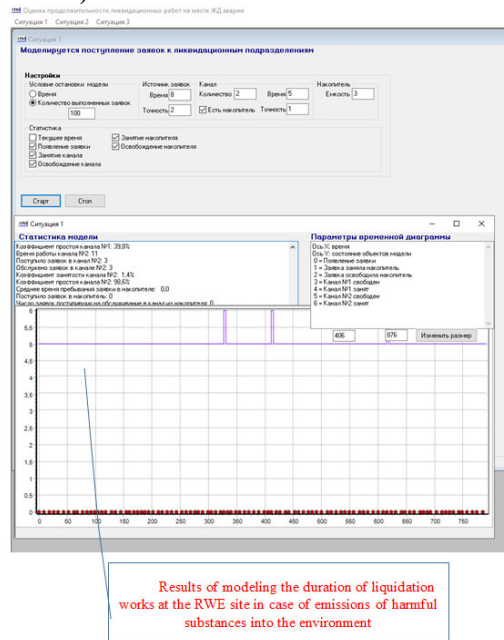


Fig. 7. General view of the program for assessing the duration of liquidation works at the RWE site with emissions of harmful substances into the Env.

Conclusion.

The objectives of this study have been fully realized through the development and application of mathematical models for the computational core of a decision support system (DSS) designed to respond to railway emergencies (RWE) involving dangerous goods (DG). The research methods included statistical analysis of railway accident data, modeling probabilistic and dynamic processes of emergency development, and constructing structural and logical schemes of actions for emergency response leaders. These methods allowed for an in-depth evaluation of the duration, volume, and efficiency of emergency mitigation activities, considering environmental impacts, technological parameters, organizational measures, and the speed of response of liquidation forces.

The main findings of this study can be summarized as follows:

1) Challenges of Decision-Making under Uncertainty: It was established that during an RWE, in conditions of incomplete or insufficient information regarding cause-and-effect relationships, the head of the emergency operations center must make numerous individual and collective decisions. These decisions, which include informational, organizational, and operational actions for coordinating subordinate control points and liquidation units, often exceed the capacity of a single manager and may affect the validity of the decisions made. This confirms the necessity of using DSS to ensure timely and informed decision-making.

2) Development of Predictive Mathematical Models: The study developed models capable of predicting emergency development, estimating the volume and duration of liquidation work, and assessing environmental risks. These models take into account the rate of emergency escalation, DG



properties, external environmental conditions, and the efficiency of liquidation forces. Integration of these models into DSS enables optimization of force concentration and deployment, significantly reducing emergency consequences and response times.

3) Formalization of the DG Railway Transport System: The system has been formalized as an oriented graph of the safe functioning states of the Railway Information System (RIS), considering emergency occurrence, assessment, localization, and elimination of consequences. This formalization allows for calculating the probability of RIS remaining in a safe state during DG transportation under varying technological and organizational measures. The models enable scenario-based simulation of accident consequences, providing predictive assessments of environmental and economic impacts.

4) Efficiency Enhancement through DSS and Modern Monitoring Tools: The use of UAVs, environmental sensors, surveillance cameras, and intelligent DSS allows for early situational assessment, rapid decision-making, and optimal allocation of resources. Simulation results indicate that even small reductions in decision-making time significantly decrease the total duration of liquidation work, thus minimizing cargo losses, environmental damage, and economic consequences.

5) Practical Implications and Prospects for Implementation: The proposed models and DSS can be implemented as practical software solutions capable of real-time assessment and management of RWE at DG transportation sites. The system can plan the deployment of liquidation forces, estimate environmental and economic risks, optimize resource use, and improve objectivity and efficiency in emergency management. Future development may include integration with railway traffic management systems, automated environmental monitoring, and predictive analytics, enhancing operational safety and ecological protection.

6) Scientific Contribution: The study confirms the validity of the hypotheses and contributes to advancing knowledge in modeling and managing railway emergencies with DG. The research emphasizes the importance of combining mathematical modeling, information technology, and automated decision-making to improve railway transport system reliability and safety. The approaches developed provide a foundation for further studies, including refinement of predictive models, expansion of DSS functionality, and development of comprehensive risk assessment frameworks for complex emergencies.

In conclusion, this research demonstrates that the implementation of intelligent DSS, supported by robust mathematical models, significantly enhances the operational efficiency of emergency response, ensures faster localization and elimination of RWE, reduces environmental and economic impacts, and strengthens the reliability of railway transport systems during the transportation of DG. The proposed solutions are practically applicable and open avenues for further research and real-world implementation in the fields of railway safety, environmental protection, and emergency management.

REFERENCES

Abuova, 2019 — Abuova A., et al. Conceptual model of the automated decision-making process in analysis of emergency situations on railway transport. — International Conference on Research and Practical Issues of Enterprise Information Systems. — Springer, Cham. — 2019. — Pp. 234–249. [Eng.]

Akhmetov, 2021 — Akhmetov, B. S., Shalabayeva, M. Kh. (2021). Matematicheskaya podderzhka reagirovaniya na zheleznodorozhnye avariynye situatsii [Mathematical support for responding to railway emergency situations]. // L.N. Gumilyov Eurasian National University Bulletin. Series: Technical Sciences and Technologies. — 2021. — 1(134). — Pp. 80–90. [Russ.]

Batarlienė, 2014 — Batarlienė N., Jarašūnienė A. Analysis of the accidents and incidents occurring during the transportation of dangerous goods by railway transport. — Transport. — 2014. — 29(4). — Pp. 395–400. [Eng.]

Dindar, 2019 — Dindar S., Kaewunruen S., An M. Rail accident analysis using large-scale investigations of train derailments on switches and crossings: Comparing the performances of a novel stochastic mathematical prediction and various assumptions. — Engineering Failure Analysis. — 2019. — 103. — Pp. 203–216. [Eng.]

Dvorak, 2020 — Dvorak Z., Rehak D., David A., Cekerevac Z. Qualitative Approach to Environmental Risk Assessment in Transport. — International Journal of Environmental Research and Public Health. — 2020. — 17(15). — P. 5494. [Eng.]



Gheorghe, 2005 — Gheorghe A. V., Birchmeier J., Vamanu D., Papazoglou I., Kröger W. Comprehensive risk assessment for rail transportation of dangerous goods: a validated platform for decision support. — *Reliability Engineering & System Safety*. — 2005. — 88(3). — Pp. 247–272. [Eng.]

Hooghiemstra, 1999 — Hooghiemstra J. S., Kroon L. G., Odijk M. A., Salomon M., Zwaneveld P. J. Decision support systems support the search for win-win solutions in railway network design. — *Interfaces*. — 1999. — 29(2). — Pp. 15–32. [Eng.]

Huang, 2020 — Huang W., Li Y., Kou X., Wang W., Xu Y. Using a FMEA–TIFIAD Approach to Identify the Risk of Railway Dangerous Goods Transportation System. — *Group Decision and Negotiation*. — 2020. — Pp. 1–33. [Eng.]

Khanmohamadi, 2018 — Khanmohamadi M., Bagheri M., Khademi N., Ghannadpour S. F. A security vulnerability analysis model for dangerous goods transportation by rail – Case study: Chlorine transportation in Texas-Illinois. — *Safety Science*. — 2018. — 110. — Pp. 230–241. [Eng.]

Katsman, 2011 — Katsman M., Kryvopishyn O., Lapin V. Mathematical models of decision support system for the head of the fire-fighting department on railways. — *Reliability: Theory & Applications*. — 2011. — 2(03). — Pp. 86–93. [Eng.]

Katsman, 2013 — Katsman M. D., Myronenko V. K., Adamenko M. I. Problematic model of ecological consequences of railroad accidents. — *Reliability: Theory & Applications*. — 2013. — 8(1). — Pp. 72–85. [Eng.]

Katsman, 2015 — Katsman M. D., Myronenko V. K., Matsiuk V. I. Mathematical models of ecologically hazardous rail traffic accidents. — *Reliability: Theory & Applications*. — 2015. — 10(1). — Pp. 28–39. [Eng.]

Knapcikova, 2018 — Knapcikova L., Konings R. European railway infrastructure: a review. — *Acta Logistica*. — 2018. — 5(3). — Pp. 71–77. [Eng.]

Kornaszewski, 2017 — Kornaszewski M., Chrzan M., Olczykowski Z. Implementation of new solutions of intelligent transport systems in railway transport in Poland. — *International Conference on Transport Systems Telematics*. — Springer, Cham. — 2017. — Pp. 282–292. [Eng.]

Nowacki, 2016 — Nowacki G., Krysiuk C., Kopczewski R. Dangerous goods transport problems in the European Union and Poland. — *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. — 2016. — 10(1). — Pp. 21–29. [Eng.]

Schröder, 2016 — Schröder M., Prause G. Transportation of dangerous goods in green transport corridors – conclusions from Baltic Sea region. — *Transport and Telecommunication Journal*. — 2016. — 17(4). — Pp. 322–334. [Eng.]

Torretta, 2017 — Torretta V., Rada E. C., Schiavon M., Viotti P. Decision support systems for assessing risks involved in transporting hazardous materials: A review. — *Safety Science*. — 2017. — 92. — Pp. 1–9. [Eng.]

Zelenko, 2019 — Zelenko Y., Dzhus O., Dzhus V., Yanchenko D. Methodology of risk assessment and forms of environmental safety management for the transport of dangerous goods by railway transport. — *MATEC Web of Conferences*. — 2019. — 294. — 03011. [Eng.]

Shalabayeva, 2024 — Shalabayeva, M. Kh. Abstract of the dissertation "Methods and models of automated assessment of environmental safety during liquidation of consequences of railway transport accidents" for the degree of Doctor of Philosophy (PhD), educational program 8D07100 – Automation and Control. — 2024. — 10 p.

Shalabayeva, 2020 — Shalabayeva, M. Kh. Analiz metodov i modelei dlya avtomatizirovannoi otsenki ekologicheskoi bezopasnosti pri likvidatsii posledstviy avarii na zheleznodorozhnom transporte [Analysis of methods and models for automated assessment of environmental safety during the liquidation of consequences of railway accidents]. // *Problemy informatiki v obrazovanii, upravlenii, ekonomike i tekhnike: Proceedings of the 20th International Scientific and Technical Conference*. — Penza: Privolzhskii Dom Znaniy. — 2020. — Pp. 226–231. [Russ.]

Akhmetov, 2022 — Akhmetov B., Lakhno V., Blozva A., Shalabayeva M., Abuova A. Skladannyi P., Sagyndykova Sh. Development of a mobile automated air quality monitoring system for use in places of technogenic accidents on railway transport. // *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. — Vol.100. — №5. — 2022. — Pp. 1287–1300.

ҚАЗАҚСТАН ӨНДІРІС КӨЛІГІ
ПРОМЫШЛЕННЫЙ ТРАНСПОРТ
КАЗАХСТАНА
INDUSTRIAL TRANSPORT
OF KAZAKHSTAN

Правила оформления статьи для публикации в журнале на сайте:
<http://prom.mtgu.edu.kz>

ISSN: 1814-5787 (print)
ISSN: 3006-0273 (online)

Собственник:

Международный транспортно-гуманитарный университет
(Казахстан, г.Алматы).

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР
Мылтыкбаева Айгуль Тауарбековна

КОМПЬЮТЕРНАЯ ВЕРСТКА
Букина Светлана Владимировна

Подписано в печать 13.06.2025. Формат 60x84 1/8. Бумага офсет №1. Гарнитура «Таймс» .
Печать RISO. Объем 13,1 усл.п.л. Тираж 500 экз.
Отпечатано и сверстано в ИП «Salem». с.Бескайнар, ул.Мичурин, 52/1, тел.: +77072619261

Издание «Международный транспортно-гуманитарный университет»
Адрес редакции: г. Алматы, мкрн. Жетысу-1, д. 32а.