

**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**

**2024 №4(84)  
октябрь-декабрь**

**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 ДаниярАқбулатович** — (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 ID57680586200, 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 ID15623452500, 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, 2024

© Авторлар ұжымы, 2024

---

**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 Айнура 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 Монсфорд, 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](mailto: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 Bakhytzhon 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](mailto:info@mtgu.edu.kz)

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

## CONTENTS

### ELECTRICAL POWER ENGINEERING AND TRANSPORT AUTOMATION

- G. Yerkeldesova, A. Turdaliev**  
SIMULATION MODELING OF GPRS CHANNELS OPERATION  
IN AUTOMATED DISPATCH CONTROL SYSTEMS 17
- Zh.B. Esmambetov**  
SIMULATION MODELING FOR THE ANALYSIS OF COMPETITION MECHANISMS  
AND SURVEY SUPPORT IN QOS MANAGEMENT 30
- Zh. Zhanatkyzy, G. Morokina**  
DETERMINATION OF EQUIPMENT SHUTDOWN PREDICTION DURING  
OSCILLATORY PROCESSES 43

### COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

- K.A. Gibadullin, Mukhindi Mose**  
EFFICIENCY OF HANDLING PERISHABLE GOODS IN THE TRANSPORTATION  
PROCESS 54
- N.V. Devet'yarova**  
OPTIMIZATION OF LOGISTICS COSTS IN THE RAILWAY FREIGHT  
TRANSPORTATION SYSTEM 70
- A.P. Karpov, A.G. Seisenqozha**  
COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRENGTH OF  
AUTOMOBILE WHEELS UNDER IMPACT LOADS 89
- V.M. Ushurov**  
METHODS AND ALGORITHMS FOR TRAINING NEURAL NETWORKS BASED ON  
EXPERT KNOWLEDGE FOR EMERGENCY MANAGEMENT IN RAILWAY  
TRANSPORT 108

## МАЗМҰНЫ

### ЭЛЕКТР ЭНЕРГЕТИКАСЫ ЖӘНЕ КӨЛІКТІ АВТОМАТТАНДЫРУ

- Г. Еркелдесова, Ә. Турдалиев**  
АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ GPRS АРНАЛАРЫНЫҢ  
ЖҰМЫСЫН ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ 17
- Ж.Б. Есмамбетов**  
QOS-ТІ БАСҚАРУДАҒЫ БӘСЕКЕЛЕСТІК МЕХАНИЗМДЕРІ МЕН САУАЛНАМА  
ҚОЛДАУЫН ТАЛДАУ ҮШІН ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ 30
- Ж. Жанатқызы, Г. Морокина**  
ТЕРБЕЛМЕЛІ ПРОЦЕСТЕР КЕЗІНДЕ ЖАБДЫҚТЫҢ СӨНУІН БОЛЖАУДЫ  
АНЫҚТАУ 43



## ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР

<b>К.А. Гибадуллин, Мухинди Мозе</b> ТАСЫМАЛДАУ БАРЫСЫНДА ТЕЗ БҰЗЫЛАТЫН ЖҮКТЕРДІ ӨНДЕУ ҮДЕРІСІНІҢ ТИІМДІЛІГІ	54
<b>Н.В. Деветьярова</b> ТЕМІРЖОЛ КӨЛІГІ ЖҮЙЕСІНДЕ ЛОГИСТИКАЛЫҚ ШЫҒЫНДАРДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ	70
<b>А.П. Карпов, А.Ф. Сейсенқожа</b> АВТОМОБИЛЬ ДӨНГЕЛЕКТЕРІНІҢ СОҚҚЫ ЖҮКТЕМЕЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ КЕЗІНДЕГІ БЕРІКТІГІН ЕСЕПТІК-ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ	89
<b>В.М. Ушуrow</b> ТЕМІРЖОЛДАҒЫ ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙЛАРДЫ БАСҚАРУ ҮШІН САРАПШЫ БІЛІМДЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН НЕЙРОЖЕЛІДІ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІ МЕН АЛГОРИТМДЕРІ	108

## СОДЕРЖАНИЕ

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИЗАЦИЯ ТРАНСПОРТА

<b>Г. Еркелдесова, А. Турдалиев</b> МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КАНАЛОВ GPRS В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ	17
<b>Ж.Б. Есмамбетов</b> ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЗМОЖНОСТИ МЕХАНИЗМОВ КОНКУРЕНЦИИ И ОПРОСА В ПОДДЕРЖКЕ QOS	30
<b>Ж. Жанатқызы, Г. Морокина</b> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ	43

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

<b>К.А. Гибадуллин, Мухинди Мозе</b> ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ	54
<b>Н.В. Деветьярова</b> ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ИЗДЕРЖЕК В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК	70
<b>А.П. Карпов, А.Ф. Сейсенқожа</b> РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОЛЕС АВТОМОБИЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ НАГРУЗОК	89
<b>В.М. Ушуrow</b> МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЧС НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ	108

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

Industrial Transport of Kazakhstan

ISSN 1814-5787 (print)

ISSN 3006-0273 (online)

Vol. 21. Is. 4. Number 84 (2024). Pp. 17–29

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

<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.002>

UDC 656.2

**SIMULATION MODELING OF GPRS CHANNELS OPERATION  
IN AUTOMATED DISPATCH CONTROL SYSTEMS**

*G. Yerkeldesova, A. Turdaliev\**

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: [turdaliev.auezhan@mtgu.edu.kz](mailto:turdaliev.auezhan@mtgu.edu.kz)

**Gulzada Yerkeldesova** — PhD, associate professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [erkeldesova.gulzada@mtgu.edu.kz](mailto:erkeldesova.gulzada@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0001-6527-7180>;

**Auezhan Turdaliev** — D.Sc. (Eng.), Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [turdaliev.auezhan@mtgu.edu.kz](mailto:turdaliev.auezhan@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0000-0003-4092-3507>.

©G. Yerkeldesova, A. Turdaliev

**Abstract.** The article presents a study on the development of simulation models for GPRS channel operation within Automated Dispatch Control Systems (ADCS) for railway transport in Kazakhstan, including High-Speed Railway Transport (HSRWT). The research addresses the optimization of data transmission for navigation and movement coordination of rolling stock, emphasizing the use of mobile communication technologies such as GSM and GPRS. The study develops algorithms for predictive assessment of train location and traffic coordination while optimizing GPRS network resources. A queuing service system (QSS) approach is applied to model GPRS channels, taking into account priority traffic, channel loads, and service delays. Computational experiments conducted using a Delphi-based program demonstrate the adequacy of the developed simulation model, with deviations from experimental data not exceeding 7–9%. The proposed approach improves the efficiency of ADCS and enhances coordination of rolling stock movements. The results have practical significance for further modernization of railway transport systems in Kazakhstan, including the implementation of intelligent digital technologies for high-speed rail transport.

**Keywords:** GPRS channels, Automated Dispatch Control Systems (ADCS), High-Speed Railway Transport (HSRWT), Navigation data transmission, Queuing Service System (QSS), Traffic coordination, Railway transport modernization

**For citation:** G. Yerkeldesova, A. Turdaliev. Simulation modeling of gprs channels operation in automated dispatch control systems//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 84. Pp. 17–29. (In Eng.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.002>

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

**АВТОМАТТАНДЫРЫЛҒАН БАСҚАРУ ЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ GPRS  
АРНАЛАРЫНЫҢ ЖҰМЫСЫН ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ**

*Г. Еркелдесова, Ә. Турдалиев\**

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: [turdaliev.auezhan@mtgu.edu.kz](mailto:turdaliev.auezhan@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>;

**Әуезхан Турдалиев** — т.ғ.д., профессор, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: turdaliev.auezhan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4092-3507>.

© Г. Еркелдесова, Ә. Турдалиев

**Аннотация.** Мақала Қазақстандағы теміржол көлігінде, оның ішінде Жоғары жылдамдықты теміржол көлігінде (ЖЖТК) Автоматтандырылған диспетчерлік басқару жүйелерінде (АДБЖ) GPRS арналардың жұмысын модельдеуге арналған симуляциялық модельдерді әзірлеу мәселелерін қарастырады. Зерттеу қозғалысқа қатысатын вагондар мен локомотивтердің навигациялық деректерін беру және қозғалысты үйлестіру процесін оңтайландыруға бағытталған, мұнда GSM және GPRS сияқты ұялы байланыс технологияларының қолданылуы ерекше назарға алынды. Жоба пойыздардың орналасуын болжау және қозғалыс үйлестіру алгоритмдерін дамытуға, сондай-ақ GPRS желі ресурстарын оңтайландыруға арналған. GPRS арналарын модельдеу үшін кезекпен қызмет көрсету жүйесі (QSS) әдісі қолданылып, арнаның жүктемесі, қызмет көрсету кешігулері және басымдық берілген трафик ескеріледі. Delphi тілінде жасалған есептеу тәжірибелері ұсынылған модельдің сенімділігін көрсетті, эксперименттік деректерден ауытқу 7–9%-дан аспайды. Ұсынылған тәсіл АДБЖ тиімділігін арттырады және вагондар қозғалысын үйлестіруді жақсартады. Нәтижелер Қазақстандағы теміржол көлігін, оның ішінде жоғары жылдамдықты теміржолды, интеллектуалды цифрлық технологияларды енгізу арқылы әрі қарай жаңғыртуға практикалық маңызы бар.

**Түйін сөздер:** GPRS арналар, Автоматтандырылған диспетчерлік басқару жүйелері (АДБЖ), Жоғары жылдамдықты теміржол көлігі (ЖЖТК), Навигациялық деректерді беру, Кезекпен қызмет көрсету жүйесі (QSS), Қозғалысты үйлестіру, Теміржол көлігін жаңғырту

**Дәйексөздер үшін:** Г. Еркелдесова, Ә. Турдалиев. Автоматтандырылған басқару жүйелеріндегі GPRS арналарының жұмысын имитациялық модельдеу//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 84. 17–29 бет. (Ағыл. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.002>

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

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КАНАЛОВ GPRS В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Г. Еркелдесова, А. Турдалиев\**

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: turdaliev.auezhan@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>;

**Ауезхан Турдалиев** — д.т.н., профессор, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: turdaliev.auezhan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0000-0003-4092-3507>.

© Г. Еркелдесова, А. Турдалиев



**Аннотация.** В статье рассматривается разработка симуляционных моделей работы GPRS-каналов в рамках Автоматизированных диспетчерских систем управления (АДСУ) на железнодорожном транспорте Казахстана, включая высокоскоростной железнодорожный транспорт (ВЖТ). Исследование посвящено оптимизации передачи данных для навигации и координации движения подвижного состава с акцентом на использование мобильных технологий связи, таких как GSM и GPRS. В работе разработаны алгоритмы прогнозной оценки положения поездов и координации движения при оптимизации использования ресурсов GPRS-сети. Для моделирования GPRS-каналов применяется подход системы обслуживания очередей (QSS), учитывающий приоритетный трафик, нагрузку на каналы и задержки обслуживания. Вычислительные эксперименты, проведенные с использованием программы на языке Delphi, продемонстрировали адекватность разработанной модели, при этом отклонение от экспериментальных данных не превышает 7–9 %. Предложенный подход повышает эффективность АДСУ и улучшает координацию движения подвижного состава. Полученные результаты имеют практическое значение для дальнейшей модернизации железнодорожного транспорта Казахстана, включая внедрение интеллектуальных цифровых технологий для высокоскоростного железнодорожного сообщения.

**Ключевые слова:** GPRS-каналы, Автоматизированные диспетчерские системы управления (АДСУ), Высокоскоростной железнодорожный транспорт (ВЖТ), Передача навигационных данных, Система обслуживания очередей (QSS), Координация движения, Модернизация железнодорожного транспорта

**Для цитирования:** Г. Еркелдесова, А. Турдалиев. Моделирование работы каналов GPRS в автоматизированных системах диспетчерского управления//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 84. Стр. 17–29. (На англ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.002>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Introduction.

The transport system of Kazakhstan, including railway transport, is an important link of the country's economy. Therefore, ensuring traffic safety, timeliness of cargo and passenger transportation are quite important management tasks of a complex transport process. This task acquires particular relevance in a situation where one of the priority tasks of railway transport development in Kazakhstan is the development of promising high-speed railway transport systems (hereinafter - HSRWT). It should be noted that one of the most important subsystems in the data transmission system and HSRWT rolling stock movement coordination are the subsystems of automated traffic coordination based on the use of mobile communication technologies. As a particular example, GPRS data transmission technology can be considered.

The basis of the development of an automated system for the HSRWT movement coordination is a communication standard that satisfies the necessary requirements for the operation of the communication system as a whole. Taking into account previous researches in the field of automated dispatch control systems (ADCS) design on railway transport, as well as the results of the work of other authors (Borushko et al., 2007: 33; Davidsson et al., 2005: 255; Fay, 2000: 719), it is proposed to use the GSM standard as a mobile communication standard. The use of GSM technology provides information support for the locomotive group through voice transmission, as well as transmission of control messages based on GPRS technology.

Modernization of GSM networks, as well as the creation of networks of the fourth, fifth and subsequent generations, are directly related to the problems of high-quality radio coverage (Borushko et al., 2007: 33; Davidsson et al., 2005: 256). The corresponding increase of load, as well as operation in limited frequency bands, necessitates an increase in the controllability of channel resources (CR). The task of assessing the quality of the joint transmission of voice

messages and service data packets for HSRWT rolling stock (RS) appears as an accompanying one.

### **Materials and methods.**

For the full functioning of ADCS it is necessary to use navigation equipment and on-board intellectual systems (Borushko et al., 2007: 33), which are installed on the HSRWT means. They provide information on the HSRWT location as well as on operational management decisions. The increase of the amount of HSRWT trains and, as a result, the increase of load on the GPRS and GSM networks requires the use of higher frequencies compared to those commonly used in mobile communication systems. This leads to the need to improve the controllability of CR, and to solve the problems of estimating the existing GPRS system in order to provide the communication subsystem and data transmission for the needs of RWT. For the designed system, there is provided an equal access mode of the HSRWT rolling stock to each of the provided channels. In the ideal case, all users, involved in the HSRWT traffic control system (Borushko et al., 2007: 34; Davidsson et al., 2005: 256), should be able to transmit data packets or voice messages. We believe that voice traffic, as of a higher priority, can interrupt the GPRS packets service. In (Borushko et al., 2007:33; Gapanovich & Rozenberg, 2011: 5) it was proposed to use the term superposition. That is, the superposition determines both the intensity of received packets and those that are re-transmitted, for example, from the accumulator (buffer) of packets. Taking into account the above mentioned, the following such tasks are relevant for prospective HSRWT systems: 1) formalization of navigation data transmission tasks for traffic coordination systems, taking into account optimization of the GPRS network resources use; 2) the task of estimating the capacity and capabilities of the existing GPRS network in Kazakhstan in order to ensure the required quality of service and data transmission speed.

In (Gapanovich & Rozenberg, 2011: 5; Goldstein & Sokolov, 2010: 300; Mozharova, 2011: 216) it was noted that an important direction for the modernization of existing and in the design of new ADSCs, primarily for HSRWT, are the tasks related to the coordination of the HSRWT trains movement under conditions imposed on solving time constraints.

In (Ning et al., 2006, 2011) there were analyzed the circumstances that contribute to the imposition of restrictions on the time for solving tasks of RWT RS coordination (including HSRWT). These researches are continuing at the present time, because the task has not lost its relevance.

In (Skalozub et al., 2013: ; Arkatov, 2012: 22) the authors conducted a detailed review and analysis of various ADSCs, including the HSRWT. We should note that by the analysis of these and other publications (Levin, 2016: 38; Jianjun & Yixiang, 1998) the task of dispatch control and movement coordination in the existing automated dispatch control systems requires the further development of the used mathematical models (Jianjun & Yixiang, 1998).

According to the analysis of a number of publications (Levin, 2016: 38; Jianjun & Yixiang, 1998; Jianying, 2007: 024), it was revealed that a promising direction of the research in this subject area is the organization of assistance in decision making by the driver and the control of the data relevance that are transmitted to mobile means of HSRWT.

Also, as the analysis of the researches showed Jianjun & Yixiang, 1998; Jianying, 2007: 024; Smagulova et al., 2016: 247; Coll et al., 1990: 244), there is not well understood the problematics of algorithmization for GPRS channel operation simulation in ADCS, for example, for predictive assessment of the location and coordination of HSRWT traffic, taking into account the optimization of the GPRS network resources use.

Therefore, the analysis of previous works in this area confirms the relevance of our research.

The purpose of the work is the development of models and algorithms for automated dispatch control systems on railway transport, including high speed railway transport.

In order to achieve the goal of the work it is necessary to solve the following tasks:

- to perform further formalization of the tasks of navigation data transmission for the automated dispatch control system and the subsystem of RS movemnet coordination;
- to improve the algorithm for simulation modeling of the GPRS channel operation in ADCS, in particular, for the predictive assessment of the location and coordination of the HSRWT movement, taking into account the optimization of the GPRS resources use.

**Results.**

The main technological feature of ADCS in the context of the HSRWT system formation is the need to ensure the control and coordination of the mixed traffic of high-speed, high-speed passenger, cargo (in particular, container or trailer) and other trains. Therefore, the ADCS functions and RWT movement coordination should be linked to the appropriate categories of movement.

The automated workplace (AWP) of the dispatcher (or the client part of ADCS) is a program that is intended for the use on a ordinary PC with access to a public network. There should be noted that the client part of the system can receive information both in real time and retrospectively from the history stored on the database server (DB). Such information, in particular, includes GPS monitoring data on mobile units (MU) of RWT. Data from the database is displayed on an electronic map of the area with reference to a specific MU. This architecture of movement dispatching and coordination system of HSRWT (MDCS) on the basis of the GPS-navigation allows dispatchers by areas of their responsibility quickly to make decisions necessary to eliminate conflict situations.

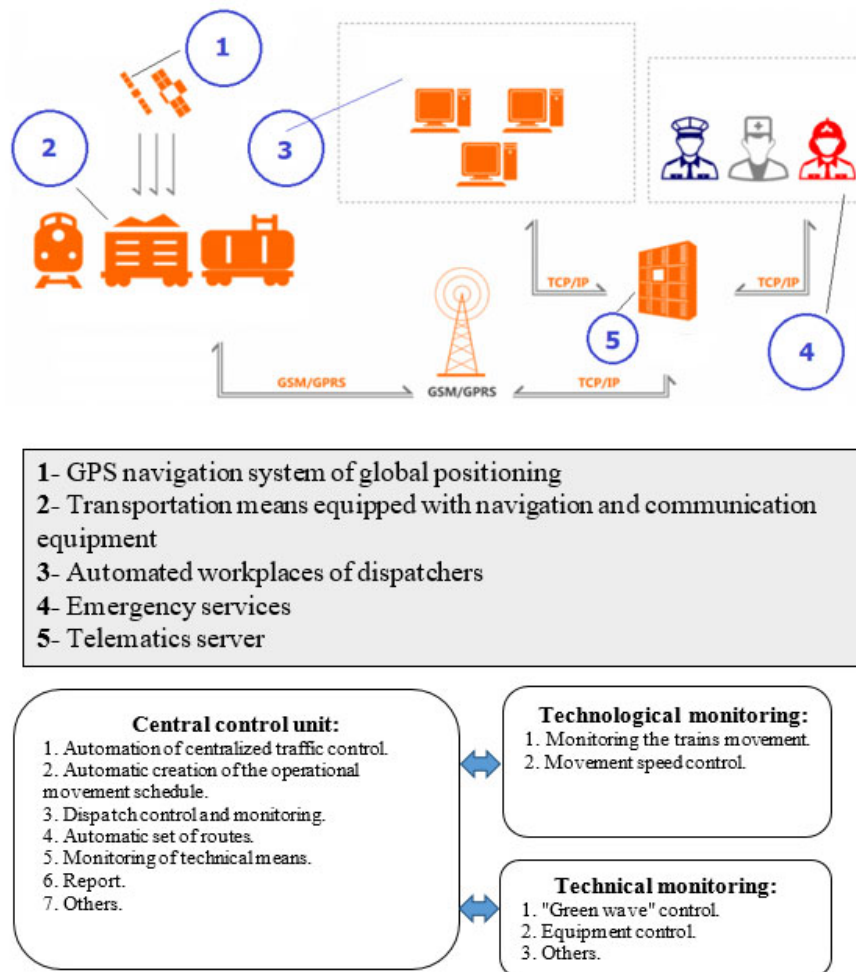


Figure 1. Scheme of information exchange of the automated dispatch control system and HSRWT movement coordination system

A distinctive feature of data transmission systems for geographically distributed ADCS is, first of all, the use of wireless communication channels - radio channels, satellite and mobile communication channels, see fig.1.

The technology of MSCS exchange information provides for the use of navigation signals from GNSS satellites. Signals are received using special GPS/GSM receivers. Further, the signals are processed and the navigation data in the WGS-84 coordinate system (latitude, longitude, time, etc.) are obtained from the processing results. In this system there are used receivers with a frequency of information update at least 5 times per second (5 Hz), since they provide the necessary accuracy in calculating the location of the RWT object on the map.

Navigation signals are received at a frequency of 1227.6 MHz using GNSS Navstar/GPS. Or at a frequency of 1200 MHz for GLONASS. The use of GPRS technology on RWT has led to a significant increase of the transmission capacity of data transmission channels (Borushko et al., 2007: 35; Smagulova et al., 2016: 247; Coll et al., 1990: 244).

If EDGE technology is used (Fay, 2000: 719; Gapanovich & Rozenberg, 2011: 5; Goldstein & Sokolov, 2010: 300; Mozharova, 2011: 216), which is not very different from GPRS, it can also be implemented on existing networks. Modernization of MDCS at the implementation of EDGE will entail the need to solve other problems. This, in particular, relates to issues that relate to changes in coding schemes, as well as to the modernization of software on network components.

In connection with these features of modern ASDUs functioning on RWT, the task of communication subsystem optimization with respect to such parameters as time, cost and reliability of message delivery has a particular importance. The fig. 2 shows the structure of the navigation data acquisition subsystem. The scheme has a hierarchical structure, the elements of which are MU of RWT, the railway dispatcher's AWP, the railway dispatcher's AWP for Kazakhstan, message commutation centers (SSGN) and communication channels. At the top level of the hierarchy is the dispatcher's AWP of the corresponding dispatcher zone (DZ), and the lower level of the hierarchy is represented by the MU.

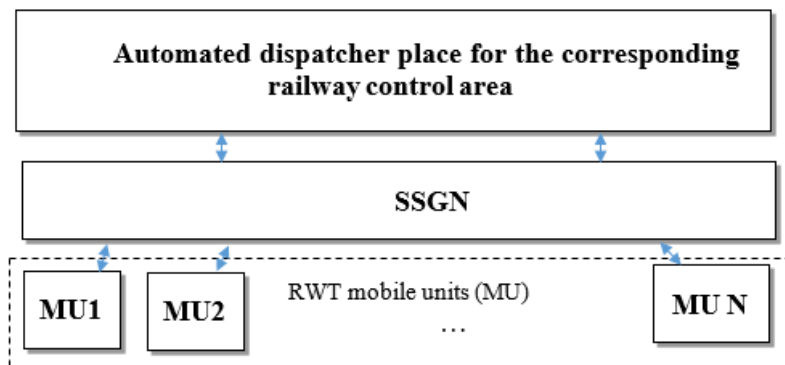
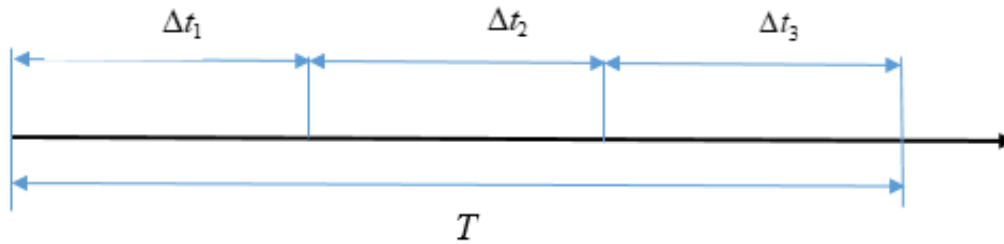


Figure 2. Structural diagram of the navigation data collection subsystem for ADCS

The main data flow in the subsystem shown on Fig. 2 consists of the results of received navigation information coming from the MU to the upper level - AWP for the dispatcher zone (DZ). In addition, the system can also transfer other information, for example, control actions in case of conflict situations on railway. The peculiarity of the MU movement coordination system is the binding to time and a given time of the data relevance. The fig. 3 shows the procedure for data collection from the MU.



The figure describes the periods:  $\Delta t_1$  – data collection;  $\Delta t_2$  – data processing;  $\Delta t_3$  – control message sending;  $T$ – the period of time during which the data is relevant (time sufficient for decision making on the MU movement coordination).

Figure 3 – Scheme of time intervals for linking navigation data collection process

Optimization of data collection and transmission subsystem for ADCS is proposed to be implemented according to one of the following three criteria:

1. optimization according to the message delivery time. This criterion implies prompt delivery of messages or transfer of information maximum per unit of time with available communication channels (CC);
2. optimization according to the message delivery cost. This parameter provides that the cost of sending a message will be minimized for existing CC;
3. optimization according to the transmission reliability. The third criterion provides that the probability of an error during data transmission is minimized.

The GPRS system, as well as any communication network, is modeled by a queuing service system (QSS). Accordingly, in the calculation of the capacity the are used formulas that correspond to the selected model of QSS.

**Discussion.**

Since the GPRS system uses the packet commutation mode, then in our case we will use the queuing-based QSS model (Coll et al., 1990: 250) for modeling.

In the modeled subsystem it is proposed to use statistical information. That is, we use data that characterize the flows in the GPRS transport network. And, moreover, there is adopted a limit on the memory size in the nodes of the GPRS system. It is possible to simulate the operation of a GPRS switch using QSS -  $M / G / 1$  (i.e., the Poisson flow at the input, then the general distribution law for operation time, one server unit, the buffer size is infinite).

The average delay value for the protocol block (PB) in this case can be calculated from the Khinchin-Polacek dependence (see (Smagulova et al., 2016: 247; Coll et al., 1990: 244)):

$$\bar{t}_q = \frac{\bar{q}}{\lambda} = \bar{t}_a \cdot \left( 1 + p \cdot \left( \frac{1 + C_a^2}{2 \cdot (1 - p)} \right) \right), \tag{1}$$

where  $\bar{q}$  – average queue length in QSS;

$p = \lambda / \mu$  – QSS load intensity of the type  $M / G / 1$ ;

$\lambda, \mu$  – the intensity of the receipt and service of packages in the QSS, respectively;

$\mu = 1 / \tau$ ;  $\tau$  – average size of PB;

$\bar{t}_a$  – average service time;

$C_a^2 = D(t_a) / (\bar{t}_a)^2$  – quadratic service time modification coefficient.

In the course of maximum capacity calculations of the data transmission subsystem for ADCS, it is necessary to take into account the fact that as the scale of the development of the HSRWT system in Kazakhstan increases, the amount of MU equipped with these devices will increase accordingly. Consequently, the value  $\lambda$ . will increase. This, in turn, makes the task of

control automation over the value  $\bar{t}_q$  actual as the traffic increases over the GPRS channels used by RWT.

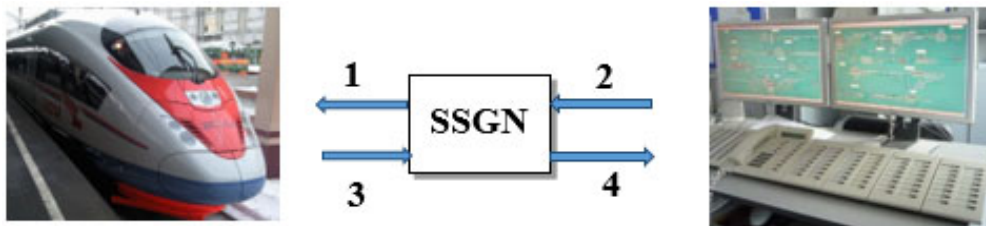
Because the GPRS node serves packets, for its modeling there can be used a relation  $M / D / 1$  (since the maintenance time is a constant value).

Then the expression (1) takes the following form:

$$\bar{t}_q = \bar{t}_a \cdot \left( 1 + p \cdot \left( \frac{p}{2 \cdot (1 - p)} \right) \right) \quad (2)$$

For calculations according to the equation (1), except for intensity  $\lambda$  (taken as the amount of PB per unit of time) and according to the average length of the PB (bits per block), the parameter  $C_a^2$  is required. In turn, the capacity of the GPRS transport network is determined by the requirements for quality of service indicators, in particular, by the delay parameters (Smagulova et al., 2016: 249; Coll et al., 1990: 252).

Let consider the process of GPRS channel modeling as a QSS with one serving channel, see fig. 4.



1, 2 – control messages for MU; 3, 4- navigation information in ADCS

Figure 4. Scheme for SSGN channel simulation on RWT

Let introduce the following notations:  $\tau$  – time of application servicing in QSS (adopted distribution law -  $f(\tau)$ ). Applications are alternately served in the received order, and the time spent in the queue does not exceed  $\tau^e$  with its own distribution law  $\varphi(\tau^e)$ . For different applications, the value  $\tau^e$  is independent. As a result of simulation, we will track such parameters: 1) serviced orders; 2) rejected; 3) average waiting time in the queue. You can also make a forecast for free channels. The work of the QSS is considered in the time interval  $[0, T]$ . Applications submitted outside this interval, are not considered. This also applies to applications whose service began in the specified interval, but was not completed. We believe that the application was rejected, if inequalities are true  $t^{st} < T$ ,  $t^{end} > T$ , where  $t^{st}$ ,  $t^{end}$  – the time of the beginning and end of the application service, respectively. The fig. 5 shows a step-by-step block diagram of the algorithm for simulation modeling of GPRS channels operation as part of the ADCS data transmission subsystem. The steps of the algorithm are described below (Points: P1 – P20 on Fig. 5.):

1. Generation of random values of the moments  $t_j$  of the applications receipt in the system.
2. Application control, which arrived at the moment  $t_j$ , in the interval  $[0, T]$ . If this condition is not satisfied, then go to step 19.

3. Verification  $t_j < t_{j-1}^r$ , where  $t_{j-1}^r$  – the moment of release of the service channel from the previous application. If the condition is false, then go to step 8.
4. Generation of random queue length values for the distribution law  $\varphi(\tau^e)$
5. The calculation of the upper limit  $t_j^e$  for the waiting interval  $[t_j, t_j^e]$  of the application in the queue.
6. Control of  $t_j^e < t_{j-1}^r$ . If the condition is true, then go to p. 14.
7. Generation of service starting time of the  $j$  application  $t_j^{st} = t_{j-1}^r$  and transition to the step 9.
8. Generation of service starting time of the  $j$  application  $t_j^{st} = t_j$ .
9. Generation of the time period  $\tau$  when the channel is busy according to the distribution  $f(\tau)$ .
10. Calculation of time  $t_j^r$  for the  $j$  application (SSGN channel release).
11. Control of  $t_j^r < T$ . If the condition is false, then go to step 14.
12. Increasing the counter value of the served requests -  $m$ .
13. Calculation of waiting time  $(t_j^{st} - t_j)$  for service of the  $j$  application.
14. Increasing the counter value of the amount of applications  $\bar{m}$  that were rejected.
15. The calculation of the intensity of packages receipt and their service.
16. Calculation of  $\bar{t}_q$ .
17. Control of the condition  $\bar{t}_q < T_q$  where  $T_q$  – the size of the maximum delay in the GPRS channel. In case of a channel overflow, it is necessary to switch to another service channel (SSGN) - step 18.
18. Switching to another service channel.
19. Assessment of simulation modeling results of the SSGN channel.
20. Compilation of channel (channels) employment forecast estimate.

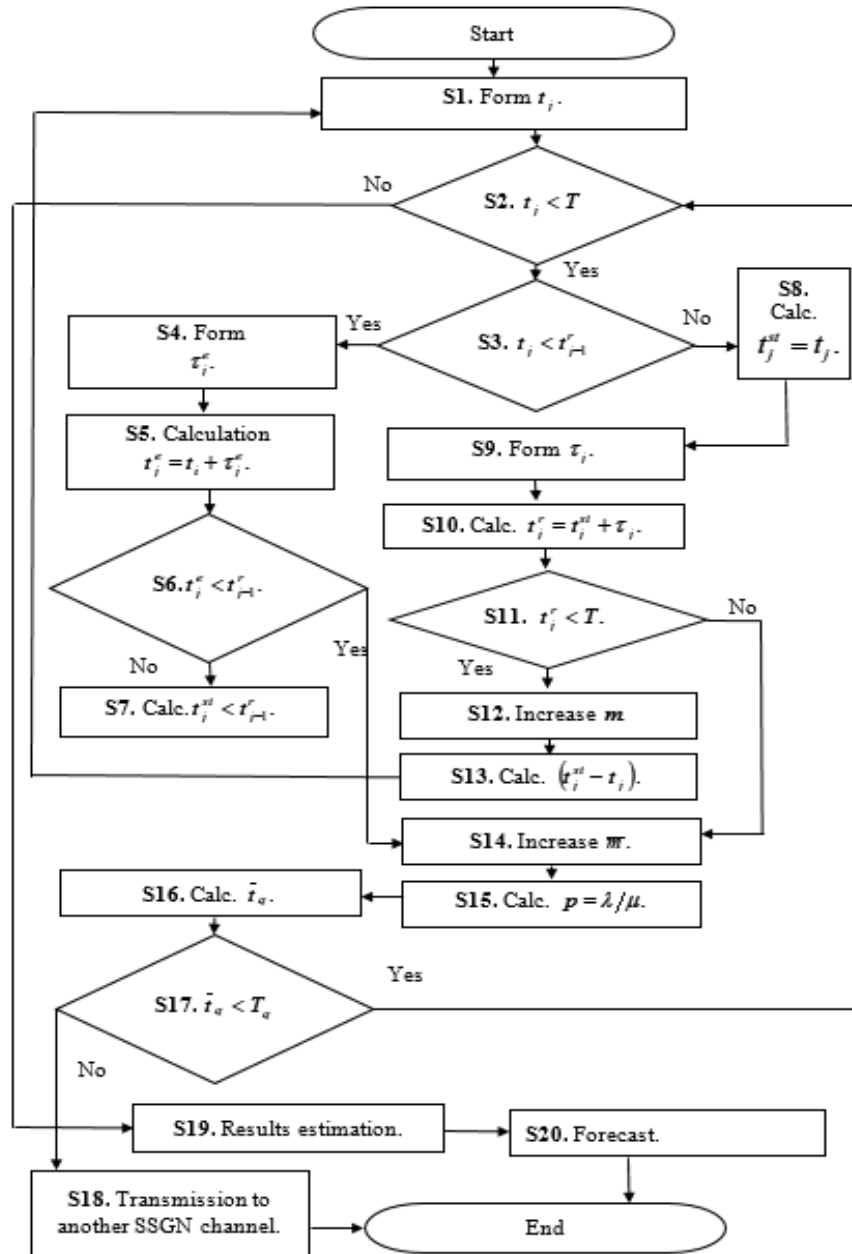
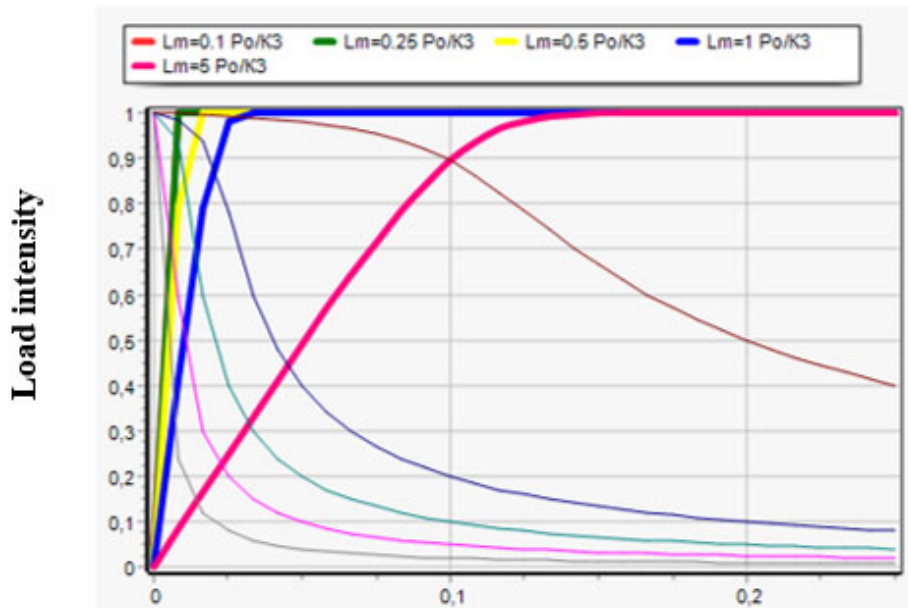


Figure 5. The block diagram of the algorithm for the simulation of the GPRS channels operation as a part of the ADCS data transmission subsystem

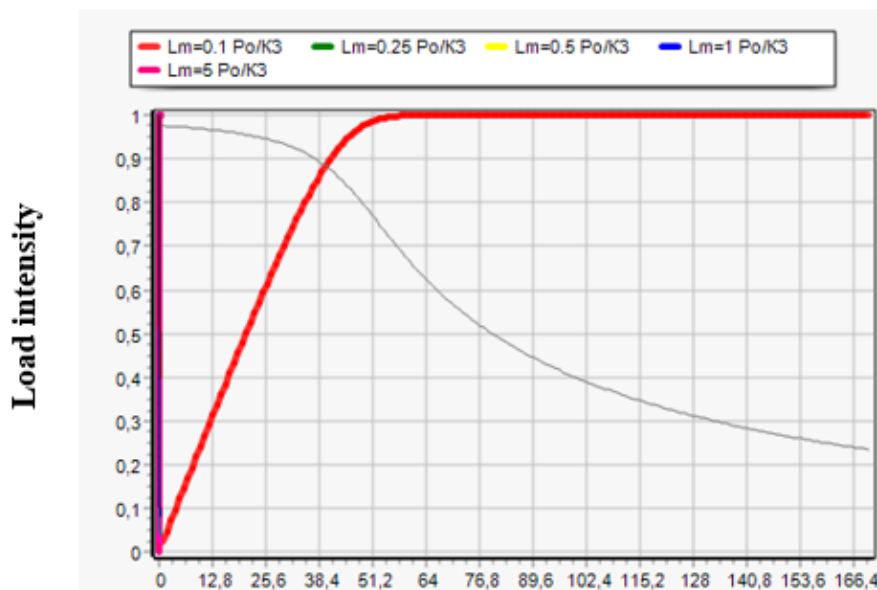
In order to test the effectiveness of the algorithm for simulation modeling of the SSGN channel, there was written a corresponding program in Delphi language, with the help of which computational experiments were implemented.

The fig. 6, 7 show examples of the results obtained during computational experiments. These results allow in subsequent researches to talk about the possibility of tasks automatization on RS movement coordination and dispatching. Computational experiments were performed on a PC with an i7 processor.



Average delay value for a protocol block

Figure 6. The results of the algorithm testing



Average delay value for a protocol block

Figure 7. The results of the algorithm testing

Therefore, during the simulation modeling there was confirmed the expediency and prospects of GSM technology use for information data exchange organization in the system of railway transport movement coordination in the Republic of Kazakhstan, including the prospects for the development of HSRWT systems. There is considered the technology of information data exchange in the system of transport means movement coordination, are described the main characteristics of the components of the data transmission system. During the research, there was solved the problem of estimating the GPRS network capacity on the basis of the mathematical apparatus of queuing systems. The developed simulation model for navigation data collection has an acceptable adequacy; the deviation from the experimental data does not exceed 7–9%.

In our opinion, the advantage of the proposed approach is the fact that the developed algorithm for solving simulation problems of the SSGN channel allows, in general, an increase in the efficiency of ADCS and RS movement coordination.

### **Conclusion.**

The conducted research demonstrates the relevance and necessity of developing advanced simulation models for GPRS channel operation within Automated Dispatch Control Systems (ADCS) on railway transport in Kazakhstan, particularly in the context of High-Speed Railway Transport (HSRWT). The integration of mobile communication technologies, including GSM and GPRS, into ADCS provides a reliable foundation for the real-time coordination of rolling stock movement, ensuring safe, timely, and efficient transportation. The developed simulation model, based on the queuing service system (QSS) approach, allows for predictive assessment of data transmission processes, including the prioritization of voice traffic, optimization of network resource usage, and minimization of delays in information delivery.

Computational experiments conducted using the Delphi-based software demonstrate the practical applicability and adequacy of the proposed algorithms, with deviations from experimental data remaining within 7–9%. The results confirm that the proposed approach can significantly enhance the operational efficiency of ADCS by providing dispatchers with accurate, timely, and relevant navigation and control data. This improvement, in turn, facilitates more effective coordination of mixed traffic flows, including high-speed passenger, cargo, container, and trailer trains, which is critical for the modernization of Kazakhstan's railway infrastructure.

Moreover, the research highlights the importance of systematic optimization of GPRS network parameters, taking into account message delivery time, cost, and reliability. Such optimization ensures a balanced and efficient utilization of communication channels, even under increasing traffic loads associated with HSRWT expansion. The study also underscores the need for integrating intelligent on-board systems, real-time GPS monitoring, and data analysis tools to support decision-making processes for train movement coordination.

The developed models and algorithms can serve as a foundation for further modernization of ADCS in Kazakhstan, including the implementation of EDGE, 4G, 5G, and subsequent-generation networks, which will enhance the scalability and flexibility of railway communication systems. In addition, the proposed methods contribute to the improvement of automated traffic management for HSRWT, enabling predictive scheduling, timely response to conflict situations, and enhanced safety standards.

Finally, the research outcomes have broader implications for the development of intelligent railway systems in Kazakhstan. They support the country's strategic goals of improving transport efficiency, integrating with international transport corridors, and adopting digital technologies to ensure competitiveness on the global stage. The findings of this study can be applied not only to HSRWT systems but also to conventional railway networks, contributing to the creation of a unified, intelligent, and resilient transport infrastructure. Future work will focus on extending the simulation models to include multi-modal transport coordination, integration with AI-based decision support systems, and further validation under real-world operational conditions, ensuring sustainable development of Kazakhstan's railway transport sector.

### **REFERENCES**

- Arkatov, 2012 — Arkatov, D.B. Models of decomposition and parallel processing of data from an automated system for mobile units movement coordination. — *Problems and Information Technologies*. — 2012. — No. 2. — Pp. 22–28. [Russ.]
- Borushko, 2007 — Borushko, Yu.M., Semenov, S.B., Titov, N.N. ACS “Navigation and Control” based on satellite technologies for railway transport. — Moscow: RDII. — 2007. — Pp. 33–37 [Russ.]
- Coll, 1990 — Coll, D.C., et al. The communications system architecture of the North American advanced train control system. — *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. — 1990. — Vol. 39. — No. 3. — Pp. 244–255. [Eng.]
- Davidsson, 005 — Davidsson, P., et al. An analysis of agent-based approaches to transport logistics. — *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. — 2005. — Vol. 13. — No. 4. — Pp. 255–271. [Eng.]

- Fay, 2000 — Fay, A. A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control. — Engineering Applications of Artificial Intelligence. — 2000. — Vol. 13. — No. 6. — Pp. 719–729. [Eng.]
- Gapanovich, 2011 — Gapanovich, V.A., Rozenberg, I.N. The main directions of intellectual railway transport development. — Railway Transport. — 2011. — No. 4. — Pp. 5–11. [Russ.]
- Goldstein, 2010 — Goldstein, B.S., Sokolov, N.A. Communication networks. — Saint Petersburg: BHV-Petersburg. — 2010. — 400 p. [Russ.]
- Levin, 2016 — Levin, B.A. Innovatika in the scientific provision of transport security. — World of Transport. — 2016. — No. 1. — Pp. 38–41. [Russ.]
- Mozharova, 2011 — Mozharova, V.V. Transport in Kazakhstan: current situation, problems and development prospects. — Almaty: KISR under the President of the Republic of Kazakhstan. — 2011. — Pp. 216–217. [Russ.]
- Ning, 2006 — Ning, B., et al. Intelligent railway systems in China. — IEEE Intelligent Systems. — 2006. — Vol. 21. — No. 5. — Pp. 80–83. [Eng.]
- Ning, 2011 — Ning, B., et al. An introduction to parallel control and management for high-speed railway systems. — IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. — 2011. — Vol. 12. — No. 4. — Pp. 1473–1483. [Eng.]
- Jiaying, 2007 — Jiaying, W. Railway Traffic Dispatching Control Simulation System. — China Railway Science. — 2007. — Vol. 5. — P. 024. [Eng.]
- Skalozub, 2013 — Skalozub, V.V., Soloviev, V.P., Zhukovitsky, I.V., Goncharov, K.V. Intelligent railway transport systems (fundamentals of innovative technologies): manual. — 2013. — 221 p. [Russ.]
- Smagulova, 2016 — Smagulova, Sh.A., et al. Development and control of the transport industry in Kazakhstan. — Strategic and Project Control. — 2016. — P. 247–256. [Russ.]
- Zhou, 1998 — Zhou, L., Hu, S., Ma, J., Yue, Y. Network Hierarchy Parallel Algorithm of Automatic Train Scheduling. — Journal of the China Railway Society. — 1998. — Vol. 20(5). — Pp. 15–21. [Chin.]

Industrial Transport of Kazakhstan  
ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 21. Is. 4. Number 84 (2024). Pp. 30–42  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.003>  
UDC 656.2

## SIMULATION MODELING FOR THE ANALYSIS OF COMPETITION MECHANISMS AND SURVEY SUPPORT IN QOS MANAGEMENT

*Zh.B. Esmambetov*

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.  
E-mail: [esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz](mailto:esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz)

**Zhasulan Esmambetov** — master student, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan  
E-mail: [esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz](mailto:esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0003-7238-5288>.

© Zh.B. Esmambetov

**Abstract.** With the rapid development of IEEE 802.11 wireless local area networks and the increasing volume of multimedia traffic, the problem of providing the required Quality of Service (QoS) has become particularly relevant. Modern WLANs operate under conditions of high user density and heterogeneous traffic, which significantly complicates medium access control at the MAC layer. Therefore, the study of medium access mechanisms and their impact on network performance indicators is of great importance. The aim of this research is to analyze and compare the efficiency of contention-based access mechanisms (DCF) and polling-based controlled access mechanisms (PCF) in IEEE 802.11 wireless networks in terms of QoS support. To achieve this goal, the following tasks are addressed: analysis of existing medium access mechanisms, development of WLAN simulation scenarios in the OPNET environment, investigation of the impact of different traffic types and station density on delay, throughput, and retransmission attempts, and evaluation of the effectiveness of combining contention and polling mechanisms. The simulation results demonstrate that the DCF mechanism is more efficient for non-multimedia traffic and low station density, providing lower overhead and higher throughput. At the same time, the PCF mechanism ensures better delay performance and significantly reduces the number of retransmissions for multimedia traffic and in high-density network scenarios. It is shown that an increase in the number of stations leads to a substantial degradation of QoS when only contention-based access is used. In conclusion, the study confirms that a combination of contention-based and polling-based access mechanisms can significantly improve QoS support in IEEE 802.11 WLANs. The obtained results can be applied in the design and optimization of wireless networks intended to support multimedia and real-time services.

**Keywords:** IEEE 802.11, WLAN, QoS, DCF, PCF, simulation modeling

**For citation:** Zh.B. Esmambetov. Simulation Modeling for the Analysis of Competition Mechanisms and Survey Support in QoS Management//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 84. Pp. 30–42. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.003>.

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

**QOS-ТІ БАСҚАРУДАҒЫ БӘСЕКЕЛЕСТІК МЕХАНИЗМДЕРІ МЕН  
САУАЛНАМА ҚОЛДАУЫН ТАЛДАУ ҮШІН ИМИТАЦИЯЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ**



**Ж.Б. Есмамбетов**

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz

**Жасулан Есмамбетов** — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-7238-5288>.

© Ж.Б. Есмамбетов

**Аннотация.** IEEE 802.11 стандартына негізделген сымсыз жергілікті желілердің қарқынды дамуы және мультимедиялық трафик көлемінің артуы қызмет көрсету сапасын (Quality of Service, QoS) қамтамасыз ету мәселесінің өзектілігін арттырып отыр. Қазіргі WLAN желілері абоненттік құрылғылардың жоғары тығыздығы мен әртекті трафик жағдайында жұмыс істейді, бұл деректерді беру ортасына қол жеткізуді басқаруды едәуір күрделендіреді. Осыған байланысты MAC-деңгейіндегі ортаға қол жеткізу механизмдерін зерттеу маңызды ғылыми және практикалық міндет болып табылады. Зерттеудің мақсаты — IEEE 802.11 сымсыз желілерінде QoS қолдау тұрғысынан бәсекелестік қол жеткізу механизмі (DCF) мен сауалнамаға негізделген басқарылатын қол жеткізу механизмі (PCF) тиімділігін талдау және салыстыру. Аталған мақсатқа жету үшін ортаға қол жеткізу механизмдерін талдау, OPNET ортасында WLAN модельдеу сценарийлерін әзірлеу, әртүрлі трафик түрлері мен станциялар санының кідіріс, өткізу қабілеті және қайта жіберу санына әсерін зерттеу, сондай-ақ механизмдерді біріктіріп қолданудың тиімділігін бағалау міндеттері қойылды. Модельдеу нәтижелері DCF механизмінің мультимедиялық емес трафик үшін және станциялар саны аз болған жағдайда тиімді екенін көрсетті. Ал PCF механизмі мультимедиялық трафикті беру кезінде және желі тығыздығы жоғары жағдайларда кідірісті азайтып, қайта жіберулер санын едәуір төмендететіні анықталды. Станциялар санының артуы тек бәсекелестік механизмді қолданған кезде QoS көрсеткіштерінің нашарлауына әкелетіні дәлелденді. Қорытындылай келе, бәсекелестік және сауалнама механизмдерін біріктіріп қолдану IEEE 802.11 WLAN желілерінде қызмет көрсету сапасын арттыруға мүмкіндік беретіні анықталды. Зерттеу нәтижелері мультимедиялық сервистерді қолдайтын сымсыз желілерді жобалау мен оңтайландыруда пайдаланылуы мүмкін.

**Түйін сөздер:** IEEE 802.11, WLAN, QoS, DCF, PCF, модельдеу

**Дәйексөздер үшін:** Ж.Б. Есмамбетов. QoS-ті басқарудағы бәсекелестік механизмдері мен сауалнама қолдауын талдау үшін имитациялық модельдеу//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 84. 30–42 бет. (Орыс. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.003>.

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

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ВОЗМОЖНОСТИ МЕХАНИЗМОВ КОНКУРЕНЦИИ И ОПРОСА В ПОДДЕРЖКЕ QOS

**Ж.Б. Есмамбетов**

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz

**Жасулан Есмамбетов** — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: esmambetov.zhasulan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0003-7238-5288>.

© Ж.Б. Есмамбетов



**Аннотация.** В условиях интенсивного развития беспроводных локальных сетей стандарта IEEE 802.11 и роста объёмов мультимедийного трафика особую актуальность приобретает задача обеспечения требуемого качества обслуживания (Quality of Service, QoS). Современные WLAN функционируют в условиях высокой плотности пользовательских устройств и разнородных нагрузок, что существенно усложняет управление доступом к среде передачи данных на канальном уровне. В этой связи важным является исследование механизмов доступа к среде и их влияния на основные показатели производительности сети. Целью данного исследования является анализ и сравнительная оценка эффективности механизмов конкурентного доступа (DCF) и контролируемого доступа на основе опроса (PCF) в беспроводных сетях IEEE 802.11 с точки зрения поддержки QoS. Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи: анализ существующих механизмов доступа к среде передачи данных, разработка сценариев имитационного моделирования WLAN в среде OPNET, исследование влияния различных типов трафика и плотности станций на задержку, пропускную способность и количество повторных передач, а также оценка целесообразности комбинированного использования механизмов конкуренции и опроса. В результате проведённого моделирования установлено, что механизм DCF является более эффективным при передаче немультимедийного трафика и при малом количестве станций, обеспечивая меньшие накладные расходы и более высокую пропускную способность. В то же время механизм PCF демонстрирует лучшие показатели по задержке и количеству повторных передач при передаче мультимедийного трафика и в условиях высокой плотности сети. Показано, что увеличение числа станций приводит к существенному ухудшению QoS при использовании только механизма конкуренции. В заключение сделан вывод о том, что комбинированное использование механизмов конкуренции и опроса позволяет повысить эффективность поддержки качества обслуживания в WLAN. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оптимизации беспроводных сетей IEEE 802.11, ориентированных на работу с мультимедийными сервисами.

**Ключевые слова:** IEEE 802.11, WLAN, QoS, DCF, PCF, имитационное моделирование

**Для цитирования:** Ж.Б. Есмамбетов. Имитационное моделирование для анализа возможности механизмов конкуренции и опроса в поддержке QoS//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 84. Стр. 30–42. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.003>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Введение

Бурное развитие беспроводных сетей передачи данных и стремительный рост количества мобильных и мультимедийных сервисов обуславливают повышенные требования к качеству обслуживания (Quality of Service, QoS) в беспроводных локальных сетях стандарта IEEE 802.11. Современные WLAN широко используются для передачи разнородного трафика, включая чувствительные к задержкам мультимедийные приложения (VoIP, видеоконференции), что актуализирует задачу эффективного управления доступом к среде передачи данных на канальном уровне.

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых механизмам доступа к среде в сетях IEEE 802.11, проблема обеспечения гарантированного качества обслуживания в условиях высокой плотности станций и смешанного трафика остаётся нерешённой в полной мере. Анализ существующих работ показывает, что механизмы конкуренции и опроса обладают как преимуществами, так и существенными ограничениями при работе с мультимедийным и немультимедийным трафиком (Ле, Симонина, 2015: 137–141; Анисимов, 2016: 82–98). В частности, механизмы конкуренции

демонстрируют высокую пропускную способность при малой нагрузке, но характеризуются ростом задержек и числа коллизий при увеличении количества станций, тогда как механизмы опроса обеспечивают более стабильные показатели QoS, но сопровождаются дополнительными накладными расходами (Ле, 2016б: 203–204; Ле, 2017а: 56–61).

Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью комплексного анализа механизмов доступа к среде передачи данных на MAC-уровне IEEE 802.11 с целью выявления условий их эффективного применения для поддержки QoS в WLAN с различной плотностью абонентских устройств. Особый интерес представляет сравнительное исследование механизмов распределённого конкурентного доступа (DCF) и контролируемого доступа на основе опроса (PCF) при передаче разнородного трафика в условиях моделирования.

Объектом исследования являются беспроводные локальные сети стандарта IEEE 802.11.

Предметом исследования являются механизмы доступа к среде передачи данных на канальном уровне (DCF и PCF) и их влияние на показатели качества обслуживания в WLAN.

Целью исследования является анализ и сравнение эффективности механизмов конкуренции и опроса при передаче мультимедийного и немультимедийного трафика в беспроводных сетях IEEE 802.11 с точки зрения обеспечения QoS.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать существующие механизмы доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11;
- исследовать особенности работы механизмов DCF и PCF при передаче различных типов трафика;
- разработать сценарии моделирования WLAN в среде OPNET с различным количеством станций и типами нагрузки;
- выполнить сравнительный анализ задержки, пропускной способности и количества повторных передач для различных механизмов доступа;
- определить условия, при которых комбинация механизмов конкуренции и опроса обеспечивает улучшение показателей QoS.

Методами исследования являются аналитический обзор научных публикаций, имитационное моделирование в среде OPNET, а также сравнительный анализ полученных статистических показателей.

Научная новизна исследования заключается в комплексной оценке эффективности механизмов DCF и PCF в условиях смешанного трафика и различной плотности станций, а также в обосновании целесообразности их комбинированного применения для повышения качества обслуживания в WLAN.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования полученных результатов при проектировании и оптимизации беспроводных сетей IEEE 802.11, ориентированных на поддержку мультимедийных сервисов и работу в условиях высокой плотности пользовательских устройств.

#### **Материалы и методы.**

В рамках данного исследования были сформулированы следующие научные вопросы:

- Как влияют механизмы доступа к среде передачи данных DCF и PCF на показатели качества обслуживания (QoS) в беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11?
- Насколько эффективно данные механизмы обеспечивают передачу мультимедийного и немультимедийного трафика при различной плотности станций?
- Как изменяются задержка, пропускная способность и количество повторных

передач при увеличении числа абонентских станций в WLAN?

- Способствует ли комбинированное использование механизмов конкуренции и опроса улучшению QoS в условиях смешанного трафика?

В качестве рабочей гипотезы выдвинуто предположение о том, что механизмы конкурентного доступа (DCF) более эффективны при передаче немультимедийного трафика и при малом количестве станций за счёт меньших накладных расходов, тогда как механизмы опроса (PCF) обеспечивают более стабильные показатели качества обслуживания при передаче мультимедийного трафика и в условиях высокой плотности узлов сети. Предполагается, что комбинированное применение механизмов конкуренции и опроса позволяет повысить уровень QoS в WLAN по сравнению с использованием одного механизма доступа.

Материалом исследования являются результаты имитационного моделирования беспроводных локальных сетей стандарта IEEE 802.11, полученные в программной среде OPNET Modeler. Моделируемая сеть представляет собой WLAN с одной точкой доступа (Access Point, AP) и набором абонентских станций (STA), взаимодействующих в общем беспроводном канале.

В количественном отношении материал исследования включает:

- сценарии с различным числом станций: 8, 16, 24 и 32 STA;
- четыре типа трафика: Voice (VoIP), Video (High Resolution Video Conferencing), HTTP (Heavy Browsing), FTP (High Load);
- время моделирования каждого сценария — 30 минут;
- фиксированный радиоканал с номером 1 и параметрами, установленными по умолчанию в OPNET.

В качественном отношении исследование охватывает сравнение двух принципиально различных подходов к доступу к среде передачи данных:

- механизмов конкуренции (DCF);
- механизмов опроса (PCF), а также их комбинированного использования для различных классов трафика.

Распределение типов трафика между станциями осуществлялось равномерно, что позволило обеспечить репрезентативность результатов и корректность сравнительного анализа. Такой подход минимизирует влияние случайных факторов и повышает достоверность выводов исследования.

Исследование проводилось в несколько последовательных этапов:

- Аналитический этап, включающий изучение отечественных и зарубежных научных публикаций, посвящённых механизмам доступа к среде передачи данных в WLAN и проблемам обеспечения QoS.

- Проектирование модели, в ходе которого была разработана структура беспроводной сети IEEE 802.11 в среде OPNET с заданными параметрами точек доступа, абонентских станций и типов трафика.

- Формирование сценариев моделирования, включающих различные комбинации механизмов доступа (DCF, PCF), типов трафика и количества станций.

- Проведение имитационного моделирования и сбор статистических данных по основным показателям эффективности сети.

- Анализ и интерпретация результатов, включающие сравнительную оценку задержки, пропускной способности и количества повторных передач для различных сценариев.

- Формулирование выводов о целесообразности применения и комбинирования механизмов доступа для повышения качества обслуживания в WLAN.

В работе использован комплекс научных методов, обеспечивающих полноту и достоверность полученных результатов:

- метод анализа и обобщения научных источников, применяемый для формирования теоретической базы исследования;

- метод имитационного моделирования, реализованный в среде OPNET Modeler, позволяющий воспроизводить поведение беспроводных сетей в условиях, приближенных к реальным;

- метод экспериментального исследования, заключающийся в варьировании параметров сети (количество STA, тип трафика, механизм доступа);

- метод сравнительного анализа, использованный для сопоставления показателей QoS при различных механизмах доступа;

- методы статистической обработки результатов, обеспечивающие объективность интерпретации данных моделирования.

Новизна исследования заключается в систематическом сравнении механизмов DCF и PCF в условиях смешанного трафика и различной плотности станций на основе единой модели WLAN. В отличие от ряда ранее опубликованных работ, в данном исследовании используется расширенный набор сценариев с равномерным распределением мультимедийного и немультимедийного трафика, что позволяет более точно оценить влияние механизмов доступа на показатели QoS и обосновать необходимость их комбинированного применения.

### **Результаты и обсуждение**

Механизм доступа – это механизм взаимодействия элементов сети со средой передачи данных, определяющий правила получения права передачи данных по используемому каналу. То есть механизмы доступа отвечают за решение проблемы нескольких станций, готовых одновременно использовать среду. В общем случае контроль управления доступом представляет собой некоторую работу, которую производит сеть перед тем, как принять предлагаемое новое соединение. Это процесс принятия решения о том, какой ресурс (частотный, временной, пространственный, кодовый) можно выделить для новой передачи в сеть. Существуют два механизма, которые используются для доступа к беспроводной среде на MAC- уровне: механизм конкуренции и механизм опроса. Для WLAN два вышеуказанных механизма разделяются на:

– DCF, EDCA (Enhanced Distributed Channel Access): механизмы, принадлежащие группе механизмов конкуренции;

– PCF, HCCA (HCF Controlled Channel Access): механизмы, принадлежащие группе механизмов опроса.

Далее будут рассмотрены основные существующие механизмы доступа к среде передачи данных стандарта IEEE 802.11.

Используем моделирование в OPNET для того, чтобы доказать несколько утверждений, отмеченных выше. Для простоты в качестве примера возьмем DCF и PCF, которые являются яркими представителями механизма конкуренции и механизма опроса соответственно. Задержка, количество попыток повторной передачи и пропускная способность сети используются в качестве критериев для сравнения.

Сначала построим беспроводную сеть: WLAN с одной AP и восемью STA, канал установлен в 1. Время выполнения моделирования 30 минут для каждого сценария. Другие параметры устанавливаются по умолчанию в OPNET. Создаем следующие сценарии:

- сценарий 1: 8 STA используют DCF для передачи немультимедиа трафика (HTTP трафик (Heavy Browsing));

- сценарий 2: 8 STA используют DCF для передачи мультимедиа трафика (VoIP (параметры по умолчанию в OPNET));

- сценарий 3: 8 STA используют PCF для передачи немультимедиа трафика (HTTP трафик (Heavy Browsing));

- сценарий 4: 8 STA используют PCF для передачи мультимедиа трафика (VoIP

(параметры по умолчанию в OPNET)).

Далее изменим количество STA с 8 на 16, 24, 32. В каждом случае используются 4 разных типа трафика: Voice (VoIP), Video (Video Conferencing – High Resolution Video), HTTP (Heavy Browsing), FTP (High Load). Эти типы трафика равномерно распределены между STA: например, количество STA 8, из них 2 STA передают один тип трафика; количество STA 16, из них 4 STA передают один тип трафика и т.д. Таким образом, сформируем сценарии следующим образом:

- сценарии 5, 7, 9 и 10: 8, 16, 24 и 32 STA соответственно передают 4 типа трафика посредством механизма DCF;

- сценарии 6 и 8: 8 и 16 STA соответственно передают 4 типа трафика посредством механизма DCF для немультимедиа трафика, посредством механизма PCF для мультимедиа трафика.

После получения результатов моделирования, выполним сравнение результатов:

- сценарий 1 и сценарий 2 (рисунок 20). Результаты показывают, что при использовании механизма конкуренции задержка мультимедиа трафика больше задержки немультимедиа трафика на 91 %. Это означает, что механизм конкуренции более подходит для передачи немультимедиа трафика.

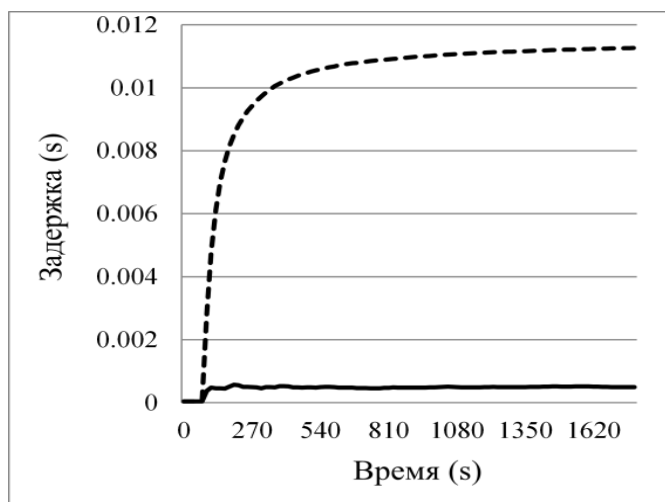


Рис. 1. Сравнение сценариев 1 (сплошная) и 2 (штриховая) по задержке

- сценарий 2 и сценарий 4 (Рис. 1). Результаты показывают, что при использовании механизма конкуренции и механизма опроса для мультимедиа трафика задержка для механизма опроса меньше на 13%. Это означает, что механизм опроса поддерживает QoS лучше, чем механизм конкуренции.

- сценарий 1 и сценарий 3 (Рис. 2). Результаты показывают, что при использовании механизма опроса количество попыток повторной передачи значительно уменьшается (на 98%), потому что происходит меньше коллизий.

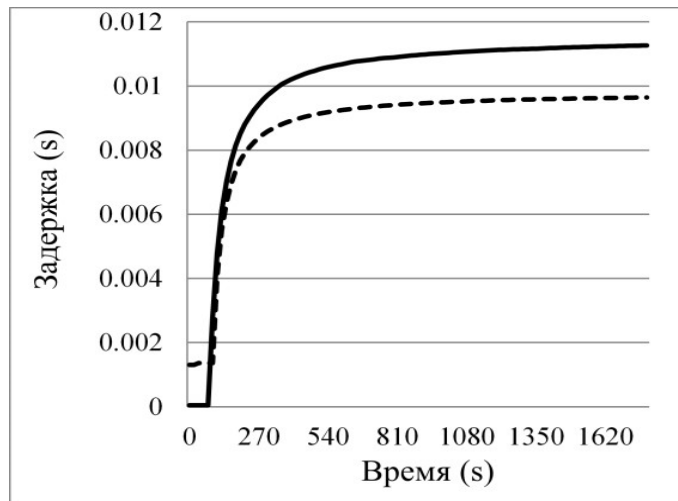


Рис. 2. Сравнение сценариев 2 (сплошная) и 4 (штриховая) по задержке

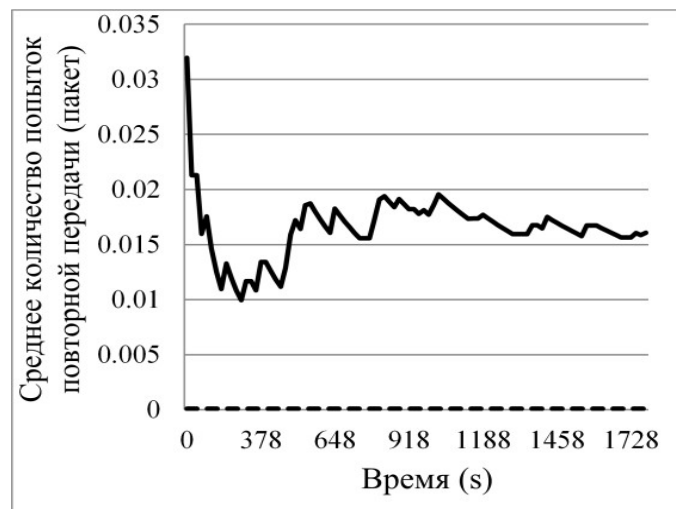


Рис. 3. Сравнение сценариев 1 (сплошная) и 3 (штриховая) по количеству попыток повторной передачи

- сценарии 5, 7, 9, 10 (Рис. 3). Результаты показывают, что при увеличении количества STA задержка также увеличивается при использовании механизма конкуренции. Конкретнее, задержка увеличивается на 95 % и 58 % при изменении количества STA от 8 до 24 STA и от 24 до 32 STA соответственно. Количество попыток повторной передачи растет на 81 % и 34% соответственно.

- сценарий 5 и сценарий 6 (Рис. 4 и 5). Результаты показывают, что при малом количестве STA пропускная способность при использовании механизма конкуренции больше, чем при использовании механизма опроса на 3%, а задержка меньше на 22 %.

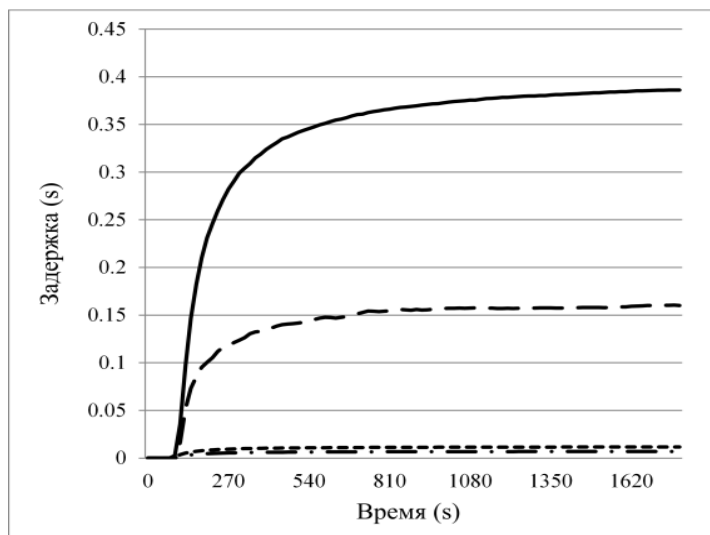


Рис. 4. Сравнение сценариев 5 (штрихпунктирная), 7 (короткая штриховая), 9 (длинная штриховая), 10 (сплошная) по задержке

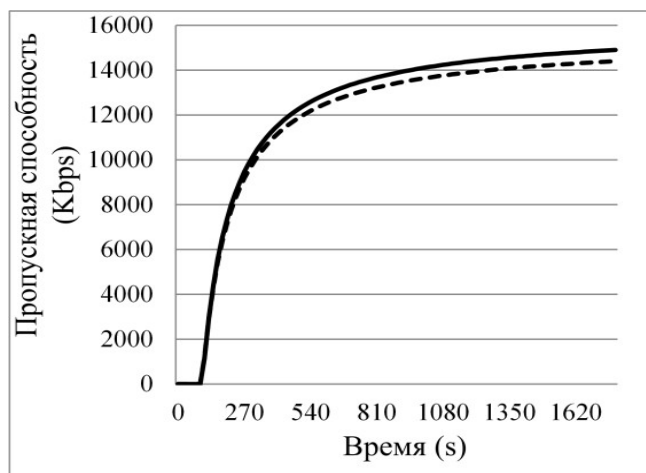


Рис. 5. Сравнение сценариев 5 (сплошная) и 6 (штриховая) по задержке

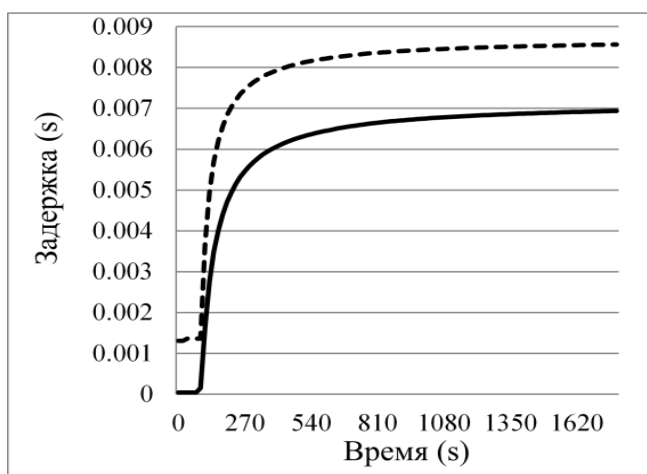


Рис. 6. Сравнение сценариев 5 (сплошная) и 6 (штриховая) по пропускной способности

- сценарий 7 и сценарий 8 (Рис. 7 и 8). Результаты показывают, что когда

количество STA увеличивается, то задержка при использовании механизма конкуренции увеличивается на 12 % по сравнению с использованием механизма опроса, а пропускная способность уменьшается на 4 %.

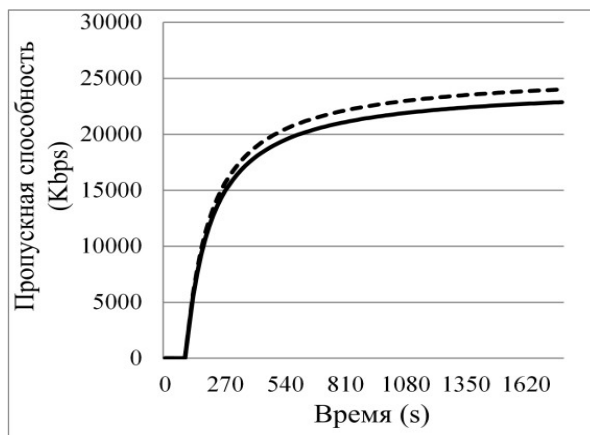


Рис. 7. Сравнение сценариев 7 (сплошная) и 8 (штриховая) по пропускной способности

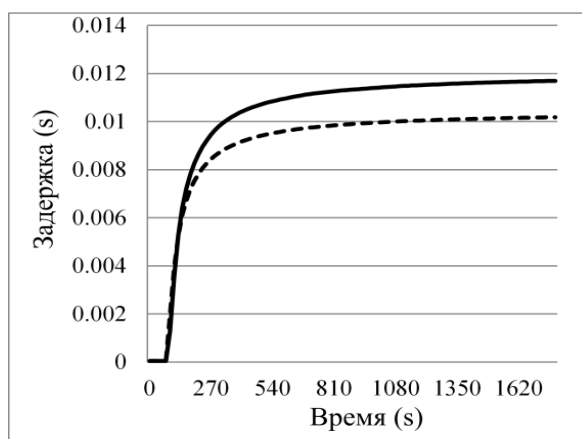


Рис. 8. Сравнение сценариев 7 (сплошная) и 8 (штриховая) по задержке

Итак, проанализированы преимущества и недостатки в поддержке качества обслуживания механизмов конкуренции и опроса. Из анализа следует, что только комбинация механизма конкуренции и механизма опроса может улучшить способность поддерживать QoS в WLAN. Однако, такая комбинация недостаточна, потому что существуют другие проблемы, которые необходимо решить для достижения лучшей производительности сети, например, проблема расхода опроса, метод планирования трафика на MAC-уровне, способность поддержки VBR (Variable Bit Rate) трафика.

### Заключение

В настоящей работе выполнено комплексное исследование механизмов доступа к среде передачи данных на канальном уровне беспроводных локальных сетей стандарта IEEE 802.11 с целью оценки их способности обеспечивать требуемое качество обслуживания при передаче разнородного трафика. Основное внимание было сосредоточено на сравнительном анализе механизмов конкурентного доступа (DCF) и контролируемого доступа на основе опроса (PCF) в условиях различной плотности абонентских станций и смешанной нагрузки.

Поставленная цель исследования — анализ эффективности механизмов конкуренции и опроса с точки зрения поддержки QoS в WLAN — была достигнута за счёт

использования имитационного моделирования в программной среде OPNET Modeler. В ходе работы был реализован комплексный методический подход, включающий аналитический обзор научных источников, проектирование модели беспроводной сети, формирование сценариев моделирования и сравнительный анализ ключевых показателей производительности.

Методы исследования были реализованы последовательно и системно. Имитационное моделирование позволило воспроизвести функционирование сети IEEE 802.11 в условиях, приближенных к реальным, с контролируемым изменением числа станций, типов трафика и используемых механизмов доступа. Применение экспериментального и сравнительного методов обеспечило объективность анализа задержки, пропускной способности и количества повторных передач, что позволило всесторонне оценить влияние исследуемых механизмов на качество обслуживания.

В результате проведенного исследования были получены следующие значимые результаты. Установлено, что механизм конкурентного доступа DCF демонстрирует более высокую эффективность при передаче немультимедийного трафика в условиях малой плотности станций, обеспечивая меньшую задержку и более высокую пропускную способность за счёт отсутствия накладных расходов, характерных для механизмов опроса. Однако при передаче мультимедийного трафика и увеличении количества абонентских станций наблюдается существенный рост задержек и числа повторных передач, обусловленный увеличением вероятности коллизий.

Показано, что механизм опроса PCF обеспечивает более стабильные показатели качества обслуживания при передаче мультимедийного трафика, в частности, снижение задержки и уменьшение количества повторных передач по сравнению с механизмом конкуренции. Это подтверждает его преимущество в условиях высокой плотности сети и при работе с трафиком, чувствительным к задержкам.

Результаты моделирования также выявили закономерное ухудшение показателей QoS при увеличении числа станций в сценариях с использованием только механизма конкуренции. Рост задержки и количества повторных передач при увеличении плотности сети указывает на ограниченную масштабируемость DCF в условиях смешанного трафика. В то же время сценарии, предусматривающие комбинированное использование механизмов конкуренции и опроса, продемонстрировали более сбалансированные характеристики сети, особенно при передаче мультимедийных потоков.

Полученные результаты подтверждают выдвинутую в работе гипотезу о том, что ни механизм конкуренции, ни механизм опроса в отдельности не способны обеспечить оптимальную поддержку качества обслуживания в беспроводных сетях IEEE 802.11 при всех режимах работы. Механизм DCF является целесообразным для передачи немультимедийного трафика при ограниченном числе станций, тогда как механизм PCF более эффективно поддерживает QoS для мультимедийных сервисов и в условиях высокой плотности узлов.

Таким образом, доказана истинность утверждения о необходимости комбинированного использования механизмов конкуренции и опроса для повышения эффективности WLAN. Полученные результаты вносят вклад в развитие научных представлений о механизмах управления доступом к среде передачи данных и расширяют существующие подходы к обеспечению QoS в беспроводных сетях.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных выводов при проектировании и оптимизации беспроводных локальных сетей, ориентированных на поддержку мультимедийных и сервисов реального времени. Результаты работы могут быть использованы при настройке параметров точек доступа и выборе механизмов доступа в корпоративных, образовательных и общественных WLAN с высокой плотностью пользователей.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением рассматриваемых механизмов доступа за счёт включения EDCA и HCCA, а также с разработкой адаптивных алгоритмов управления доступом, способных динамически изменять параметры MAC-уровня в зависимости от характеристик трафика и состояния сети. Дополнительным направлением является исследование поддержки трафика с переменной битовой скоростью (VBR), а также снижение накладных расходов, связанных с механизмами опроса и планирования.

Таким образом, полученные в работе результаты подтверждают актуальность выбранной темы и демонстрируют, что дальнейшее развитие механизмов комбинированного доступа и интеллектуального планирования трафика является перспективным направлением повышения производительности и качества обслуживания беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11.

#### ЛИТЕРАТУРА

Анисимов, 2016 — Анисимов Д.В. Модель и алгоритмы управления параметрами канального уровня беспроводных сетей стандарта IEEE 802.11, функционирующих в составе распределенных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. — Орёл. — 2016. — С. 82–98. [Russ.]

Ле, 2015 — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Анализ механизмов сосуществования беспроводных технологий в нелицензируемом диапазоне 2.4 ГГц. // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. — 2015. — С. 137–141. [Russ.]

Ле, 2016а — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Механизм приоритизации для обеспечения минимизации задержки в условиях конкурентной среды в сетях Wi-Fi с плотным распределением устройств. // Информационные технологии и системы. 2016. — 2016. — № 3(95). — С. 99–106. [Russ.]

Ле, 2016б — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Анализ проблем обеспечения QoS в высокоплотной Wi-Fi сети. // 71-я СПбНТОРЭС. — 2016. — С. 203–204. [Russ.]

Ле, 2017а — Ле Ч.Д. Анализ производительности высокоплотной wlan с многими точками доступа посредством моделирования в OPNET // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. — 2017. — Том 11. — №3. — С. 56–61. [Russ.]

Ле, 2017б — Ле Ч.Д. Анализ использования определения значения TXOP в IEEE 802.11. // 72-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная Дню радио (СПбНТОРЭС). — Санкт-Петербург. — 2017. — Volume 1. — С. 59–61. [Russ.]

Ле, 2017в — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Механизм мультиопроса в высокоплотных сетях IEEE 802.11 Технологии и средства связи. // Труды учебных заведений связи. — 2017. — № 3(1). — С. 80–92. [Russ.]

Ле, 2019б — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Использование SDN для обеспечения QoS в беспроводных сетях с высокой плотностью устройств. // Информационные технологии и системы. — 2016. — № 3(95). — С. 99–106. [Russ.]

Ле, 2020а — Ле Ч.Д., Симонина О.А. Организация приоритетного доступа в сетях IoT с высокой плотностью устройств и чувствительными к задержкам сервисами. // Электросвязь. — 2016. — № 9. — С. 63–67. [Russ.]

Ле, 2022 — Ле Ч.Д. EMATMM: Эффективный метод планирования трафика для механизма мультиопроса в высокоплотных WLAN. // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики: Серия Естественные и технические Науки. — 2017. — № 7-8. — С. 17–26.

#### REFERENCES

Le, 2015 — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2015). Analiz mekhanizmov sosushchestvovaniya besprovodnykh tekhnologii v neliitsenziruемом diapazone 2.4 GGts [Analysis of coexistence mechanisms of wireless technologies in the unlicensed 2.4 GHz band]. // Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsii v nauke i obrazovanii. — 2015. — Pp. 137–141. [in Russ.]

Anisimov, 2016 — Anisimov, D.V. (2016). Model' i algoritmy upravleniya parametrami kanal'nogo urovnya besprovodnykh setei standarta IEEE 802.11, funktsioniruyushchikh v sostave raspredelennykh sistem [Models and algorithms for managing data link layer parameters of IEEE 802.11 wireless networks operating as part of distributed systems]. PhD diss. (Technical Sciences), specialty 05.12.13. Orel. — 2016. — Pp. 82–98. [in Russ.]

Le, 2016a — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2016). Mekhanizm prioritizatsii dlya obespecheniya minimizatsii zaderzhki v usloviyakh konkurentnoi sredy v setyakh Wi-Fi s plotnym raspredeleniem ustroystv [Prioritization mechanism for delay minimization in competitive environments of dense Wi-Fi networks]. // Informatsionnye tekhnologii i sistemy. — 2016. — No. 3(95). — Pp. 99–106. [in Russ.]

Le, 2016b — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2016). Analiz problem obespecheniya QoS v vysokoplotnoi Wi-Fi seti [Analysis of QoS provisioning issues in high-density Wi-Fi networks]. // Proceedings of the 71st St. Petersburg Scientific and Technical Conference on Radio Electronics and Communications (SPbNTORÉS). — 2016. — Pp. 203–204. [in Russ.]

Le, 2017a — Le, Ch.D. (2017). Analiz proizvoditel'nosti vysokoplotnoi WLAN s mnogimi tochkami dostupa posredstvom modelirovaniya v OPNET [Performance analysis of high-density WLAN with multiple access points using OPNET simulation]. // T-Comm: Telekkommunikatsii i transport. — 2017. — Vol. 11. — No. 3. — Pp. 56–61. [in Russ.]



Le, 2017b — Le, Ch.D. (2017). Analiz ispol'zovaniya opredeleniya znacheniya TXOP v IEEE 802.11 [Analysis of TXOP value determination usage in IEEE 802.11]. // Proceedings of the 72nd All-Russian Scientific and Technical Conference Dedicated to Radio Day (SPbNTORÉS), St. Petersburg. — 2017. — Vol. 1. — Pp. 59–61. [in Russ.]

Le, 2017c — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2017). Mekhanizm mul'tioprosa v vysokoplotnykh setyakh IEEE 802.11 [Multi-polling mechanism in high-density IEEE 802.11 networks]. // Trudy uchebnykh zavedenii svyazi. — 2017. — No. 3(1). — Pp. 80–92. [in Russ.]

Le, 2019b — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2016). Ispol'zovanie SDN dlya obespecheniya QoS v besprovodnykh setyakh s vysokoi plotnost'yu ustroystv [Use of SDN to ensure QoS in high-density wireless networks]. // Informatsionnye tekhnologii i sistemy. — 2019. — No.3(95). — Pp. 99–106. [in Russ.]

Le, 2020a — Le, Ch.D., Simonina, O.A. (2016). Organizatsiya prioritetnogo dostupa v setyakh IoT s vysokoi plotnost'yu ustroystv i chuvstvitel'nymi k zaderzhkam servisami [Organization of priority access in IoT networks with high device density and delay-sensitive services]. // Elektrosvyaz'. — 2020. — No. 9. — Pp. 63–67. [in Russ.]

Le, 2022 — Le, Ch.D. (2017). EMATMM: Effektivnyi metod planirovaniya trafika dlya mekhanizma mul'tioprosa v vysokoplotnykh WLAN [EMATMM: An efficient traffic scheduling method for multi-polling mechanisms in high-density WLANs]. // Sovremennaya nauka: Aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki. — 2022. — No. 7–8. — Pp. 17–26. [in Russ.]

Industrial Transport of Kazakhstan  
ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 21. Is. 4. Number 84 (2024). Pp. 43–53  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.004>  
UDC 620.79

## DETERMINATION OF EQUIPMENT SHUTDOWN PREDICTION DURING OSCILLATORY PROCESSES

*Zh. Zhanatkyzy<sup>1\*</sup>, G. Morokina<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup>Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Peterburg, Russia.

E-mail: [zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz](mailto:zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz)

**Zhania Zhanatkyzy** — master student, International University of Transportation and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz](mailto:zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0001-0393-1148>;

**Galina Morokina** — c.t.s., Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Peterburg, Russia

E-mail: [galinasm404@mail.ru](mailto:galinasm404@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2504-6449>.

© Zh. Zhanatkyzy, G. Morokina

**Abstract.** Free vibration problems of a flat element are investigated by all boundary value problems; generalization of the decomposition method in dynamics is given to solve boundary value problems, while it is shown that the decomposition method gives an exact solution obtained by the direct method, which in turn makes it possible to test the parts of production plants for wear leading to the shutdown of the equipment or the whole process. By checking the strength of the equipment parts, studying the degree of risk of possible breakdowns, emergency shutdowns can be predicted, and it is also possible to create controlled shutdowns.

**Keywords:** free vibration problems, oscillatory process, decomposition method, equipment shutdown prediction, elastic and viscoelastic media

**For citation:** Zh. Zhanatkyzy, G. Morokina. Determination of equipment shutdown prediction during oscillatory processes//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 84. Pp. 43–53. (In Eng.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.004>.

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

## ТЕРБЕЛМЕЛІ ПРОЦЕСТЕР КЕЗІНДЕ ЖАБДЫҚТЫҢ СӨНУІН БОЛЖАУДЫ АНЫҚТАУ

*Ж. Жанатқызы<sup>1\*</sup>, Г. Морокина<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup>Санкт-Петербург мемлекеттік университеті, Санкт-Петербург, Ресей.

E-mail: [zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz](mailto:zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz)

**Жәния Жанатқызы** — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz](mailto:zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0001-0393-1148>;

**Галина Морокина** — т.ғ.к., доцент, Санкт-Петербург мемлекеттік университеті, Санкт-Петербург, Ресей Федерациясы



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

© Ж. Жанатқызы, Г. Морокина

**Аннотация.** Тегіс элементтің еркін тербеліс есептері барлық басқа шеткі есептерді зерттейді, шеткі есептерді шешу үшін динамикадағы ыдырау әдісін жалпылау берілген, ал ыдырау әдісі тікелей әдіспен алынған нақты шешімді беретіндігі көрсетілген, бұл өз кезегінде өндірістік қондырғылардың бөлшектерін тозу ықтималдылығын сынауға мүмкіндік береді. Жабдықтың бөлшектерін беріктікке тексеріп, ықтимал сыну қаупінің дәрежесін зерттей отырып, апаттық тоқтауларды болжауға болады, сонымен қатар бақыланатын тоқтаулар кестесін құру мүмкіндігі бар.

**Түйін сөздер:** еркін тербеліс тапсырмалары, тербеліс процесі, ыдырау әдісі, жабдықтың тоқтауын болжау, серпімді және тұтқыр серпімді орта

**Дәйексөздер үшін:** Ж. Жанатқызы, Г. Морокина. Тербелмелі процестер кезінде жабдықтың сөнуін болжауды анықтау//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 84. 43–53 бет. (Ағыл. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.004>.

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

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКЛЮЧЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССАХ

**Ж. Жанатқызы<sup>1\*</sup>, Г. Морокина<sup>2</sup>**

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан;

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.

E-mail: zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz

**Жәния Жанатқызы** — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: zhanatkyzy.zhania@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-0393-1148>;

**Галина Морокина** — к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

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

© Ж. Жанатовна, Г. Морокина

**Аннотация.** Задачи свободного колебания плоского элемента исследуют все остальные краевые задачи, для решения краевых задач дано обобщение метода декомпозиции в динамике, при этом показано, что метод декомпозиции даёт точное решение, полученное прямым методом, это в свою очередь даёт возможность тестировать детали производственных установок на предмет износа приводящей к остановке отдельного оборудования или целого технологического процесса. Проверая детали оборудования на прочность, изучая степени риска возможных поломок, можно прогнозировать аварийные остановки, также появляется возможность создания контролируемых остановов.

**Ключевые слова:** задачи свободных колебаний, процесс колебаний, метод разложения, прогноз остановов оборудования, упругая и вязкоупругая среда

**Для цитирования:** Ж. Жанатқызы, Г. Морокина. Определение прогнозирование отключения оборудования при колебательных процессах//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 84. Стр. 43–53. (На англ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.004>.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Introduction

The development of science and technology, the creation of new structures, and the use of high-quality materials and advanced technologies have placed increasing demands on research in the field of deformable media dynamics. In recent decades, there has been growing interest in both theoretical and applied studies of oscillatory processes in elastic and viscoelastic bodies. This trend is driven by the increasing complexity of equipment designs and the need to enhance reliability and durability.

The choice of this research topic is motivated by a problematic situation: despite substantial progress in solid mechanics, many classes of boundary value problems associated with non-stationary oscillations and interactions of structural elements with deformable media remain insufficiently studied. Specifically, issues related to the consideration of rheological properties, material anisotropy, thermal effects, geometric features, and complex boundary and operating conditions are of particular concern.

The relevance of this research is determined by its practical significance. Understanding oscillatory processes in planar and spatial elements of elastic and viscoelastic materials allows predicting equipment reliability, monitoring wear, preventing emergency situations, and optimizing operational performance. This is crucial in mechanical engineering, shipbuilding, nuclear and hydroelectric power, space technology, as well as in seismology, geophysics, and acoustic flaw detection.

The object of this study comprises elastic and viscoelastic planar and spatial structural elements interacting with deformable media. The subject of research is the processes of non-stationary oscillations and wave propagation in these elements.

The purpose of the study is to develop effective mathematical methods for analyzing oscillatory processes in elastic and viscoelastic materials, taking into account rheological properties, and to apply these methods for predicting equipment reliability.

To achieve this goal, the following tasks were set:

- Conduct a theoretical analysis of oscillations and wave processes in elastic and viscoelastic media.
- Develop and adapt approximate methods for solving boundary value problems, particularly the decomposition method proposed by G. Pshenichny.
- Perform numerical modeling of oscillatory processes in planar elements with various boundary conditions.
- Investigate the effects of viscoelastic parameters, boundary constraints, geometry, and other factors on natural frequency characteristics.
- Justify the practical application of these methods for monitoring wear and preventing equipment failure.

The research methods include mathematical modeling, approximate analytical methods (decomposition method), numerical calculations, and the use of specialized software such as Trace Mode for industrial system analysis and monitoring.

The research hypothesis posits that the decomposition method provides accurate solutions for boundary value problems in elastic and viscoelastic elements, and the results of numerical analysis can serve as a foundation for predicting equipment conditions and optimizing operational processes.

## Materials and methods.

Despite the extensive body of theoretical and applied research in this field, many significant classes of boundary value problems and their analysis remain largely unresolved or necessitate further refinement. These encompass problems related to unsteady oscillations of roads, plates, and shells while considering rheology.

To solve such problems, approximate oscillation equations derived from three-dimensional equations of motion in the theory of elasticity are commonly employed, using different hypotheses

and assumptions of mechanical or geometric nature to simplify the problem-solving process. Additionally, the original three-dimensional problem in elasticity theory is often reduced to two-dimensional or one-dimensional formulations through various mathematical techniques, including variational and asymptotic methods, power series methods, and more.

Numerous studies have been conducted to reduce three-dimensional problems to two-dimensional engineering and mathematical methods. However, these studies do not provide a complete solution. Consequently, further investigation is required to examine the dynamic behavior of circular rods interacting with a deformable medium based on vibration equations derived using rigorous mathematical techniques. This research is of significant scope, as circular rods are integral elements of various engineering structures, ranging from simple machinery, instruments, and structures to complex space technology, nuclear and hydroelectric power plants, shipbuilding, and more.

The consideration of rheological properties, material anisotropy, the shell of the interacting medium, temperature changes, varying thickness, and other factors leads to considerable complexity in studying these problems. However, accurately accounting for these factors is crucial for ensuring the strength, reliability, and durability of structures, which can result in substantial savings in material resources and minimize equipment wear (Mailybayev et al., 2019: 100–104).

Wear is a gradual deterioration of material surfaces, accompanied by changes in geometric shapes and surface layer properties of parts. Wear can be categorized as normal or abnormal, depending on the underlying causes. Chemical wear involves the formation of thin oxide layers on parts, which subsequently exfoliate from the surface, often accompanied by rust and metal corrosion. Physical wear occurs due to excessive loads, surface friction, abrasion, and mechanical stress. It can result in the development of microcracks, cracks, or roughening of the metal surface. Normal wear is associated with short-term dimensional changes due to improper installation, operation, and maintenance practices.

In summary, addressing these wear-related factors and studying the dynamic behavior of viscoelastic bodies, especially in the context of circular rods interacting with deformable media, presents complex challenges that require further investigation to ensure structural strength, reliability, and durability.

Physical wear can manifest in various forms, including confluent pitting, fatigue, abrasive erosion, and erosion. Thermal wear, on the other hand, occurs when molecular bonds within the metal appear and subsequently deteriorate due to temperature fluctuations. Several factors influence wear, which are as follows:

Material quality of the parts:

The wear resistance of parts is generally higher when the surface hardness is greater, although this relationship is not always linear.

Materials with high hardness exhibit higher wear resistance, but there is an increased risk of particle detachment. To mitigate this, parts require high viscosity to prevent particle separation.

When two parts made of homogeneous materials undergo friction, an increase in the friction coefficient leads to accelerated wear. Therefore, more expensive and complex parts should be made from harder and better-quality materials, while simpler and cheaper parts can be made from materials with lower friction coefficients.

Surface treatment quality:

Wear of a part occurs in three stages: initial wear, steady wear, and rapid-increasing wear. Optimizing the first stage through precise and clean part processing, maximizing the second stage, and preventing the third stage helps to increase the service life of parts.

Lubrication:

Introducing a layer of grease between rubbing parts fills surface roughness and unevenness, significantly reducing friction and wear.

Speed of movement and specific pressure:

Experimental data suggests that within certain specific loads and speeds (0.05 to 0.7), the oil layer remains intact, allowing parts to operate for extended periods. Increasing the load drastically increases part wear (Bondareva, 2010: 242).

Rigidity infringement in motionless parts.

Violation of fit.

Violation of relative part positions in joints.

Currently, most industrial equipment is equipped with automated control systems for monitoring process parameters. These systems collect data on equipment operating modes, store process parameters, and provide notifications for emergencies and malfunctions. The development of methods to determine equipment conditions based on process parameters is crucial for modern equipment assessment (Bondareva, 2010: 242).

**Results and discussion**

During operation, automated control systems may encounter various incidents such as sensor malfunctions, communication line breakdowns, controller/computer failures, or process parameter deviations beyond established boundaries. To ensure process continuity, the control system must include means for detecting and handling such emergency situations. Tracemode6 provides tools for this purpose, such as:

Automatic identification of hardware failures or data exchange issues by setting an unreliability sign for a channel associated with Input/Output equipment.

Automatic identification of program unreliability when channel values exceed set limits.

Monitoring FLOAT channels (analog alarms) by setting boundaries to detect abnormal process states.

Monitoring events and accidents using event class channels.

Trace Mode 6 also offers actions to prevent or mitigate accidents during ASM operation, such as alarms, operator recommendations, and blocking mechanisms. Process status information can be stored in archives and alarm reports.

To numerically analyze oscillatory processes in elastic and viscoelastic media, an effective approach is to apply the approximate method based on the decomposition method developed by Professor G. Pshenichny (Pshenichnov, 1985: 792–794; Pshenichnov, 1986:12–17) for static problems. In this context, we focus on examining the oscillation problems of flat rectangular elements under arbitrary boundary conditions along the element edges to determine the natural frequencies using the decomposition method. Initially, we present the method's formulation for the case of an elastic flat element, with future applications planned for viscoelastic materials. Figure 1 illustrates the frequency variations of natural vibrations for a viscoelastic plate.

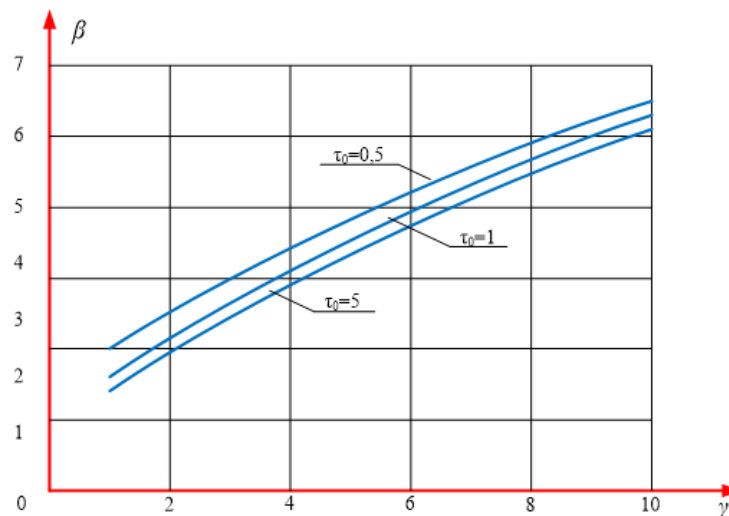


Fig. 1. Curves of changes in the frequencies of natural vibrations for a viscoelastic plate at  $\tau_0 = 0.5, \tau_0 = 1.0, \tau_0 = 5.0, \nu_1 = 0.34, \nu_2 = 0.3$

For a flat element made of elastic material, we express the approximate equation of transverse vibration as a fourth-order equation in the form

$$\Delta^2 W - D_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \Delta W + D_1 \frac{\partial^4 W}{\partial t^4} + D_2 \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

where the coefficients  $D_0, D_1, D_2$  are determined by the geometry and material properties of the flat element. Seeking a solution to the equation in the form (1), we introduce the equation

$$W = \exp\left(i \frac{b}{h}\right) W_0(x, y) \quad (2)$$

by substituting (2) for  $W_0$ , yielding equation (3):

$$\Delta^2 W_0 + D_0 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \xi^2 \Delta W_0 + \xi^2 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \left[ D_1 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \xi^2 - D_2 \right] W_0 = 0 \quad (3)$$

To facilitate the decomposition method, it is advantageous to introduce new independent and dependent variables as follows:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{\pi}{l_1} x; & \beta &= \frac{\pi}{l_2} y; & W_0 &= \frac{l_1^4}{\pi^4} v; \\ \lambda &= \frac{l_1}{l_2}; & \lambda_1 &= \frac{l_1}{\pi h} \end{aligned} \quad (4)$$

Expressed in these variables (4), equation (3) takes the form:

$$\begin{aligned} &\left[ \frac{\partial^4 v}{\partial \alpha^4} + 2\lambda^2 \frac{\partial^4 v}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + \lambda^4 \frac{\partial^4 v}{\partial \beta^4} \right] + \lambda_1^2 D_0 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \xi^2 \times \\ &\times \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial \alpha^2} + \lambda^2 \frac{\partial^2 v}{\partial \beta^2} \right] + \lambda_1^4 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \xi^2 \left[ D_1 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \xi^2 - D_2 \right] v = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

The decomposition method in the theory of oscillations follows a general procedure (7). We state the auxiliary problems as follows:

Problem 1: Determine a solution to the equation

$$\frac{\partial^4 v_1}{\partial \alpha^4} = f^{(1)}(\alpha, \beta) \quad (6)$$

subject to boundary conditions

$$L_1(\alpha, \beta) = 0; \quad L_2(\alpha, \beta) = 0; \quad (\alpha = 0; \pi) \quad (7)$$

Problem 2: Determine a solution to the equation

$$\lambda^4 \frac{\partial^4 v_2}{\partial \beta^4} = f^{(2)}(\alpha, \beta) \quad (8)$$

subject to boundary conditions

$$L_3(\alpha, \beta) = 0; \quad L_4(\alpha, \beta) = 0; \quad (\beta = 0; \pi) \quad (9)$$

The specific boundary conditions at the plate edges depend on the fixation conditions or the presence of free edges, which may involve stresses.

The remaining part of equation (5) is denoted as

$$2\lambda \frac{\partial^4 v_3}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + \lambda D_0 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \xi^2 \left( \frac{\partial^2 v_3}{\partial \alpha^2} + \lambda^2 \frac{\partial^2 v_3}{\partial \beta^2} \right) + \lambda_1^4 D_0 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \times$$

$$\times \xi^2 \left[ D_1 \left(\frac{b}{h}\right)^2 \xi^2 - D_2 \right] v_3 + f^{(1)}(\alpha, \beta) + f^{(2)}(\alpha, \beta) = 0, \quad (10)$$

where  $f^{(j)}(\alpha, \beta)$  represents arbitrary functions whose specific form depends on the boundary value problems being solved. Following the decomposition method, we assume that

$$v_3 = \frac{1}{2} [v_1 + v_2] \quad (11)$$

must also satisfy certain conditions at designated points of the plane element. The general solutions of the auxiliary problems' equations (6) and (8) can be expressed as

$$v_1 = f_1(\alpha, \beta) + \frac{\alpha^3}{6} \varphi_1(\beta) + \frac{\alpha^2}{2} \varphi_2(\beta) + \alpha \varphi_3(\beta) + \varphi_4(\beta); \quad (12)$$

$$v_1 = f_1(\alpha, \beta) + \frac{\beta^3}{6} \psi_1(\alpha) + \frac{\beta^2}{2} \psi_2(\alpha) + \beta \psi_3(\alpha) + \psi_4(\alpha);$$

where  $\varphi_j, \psi_j$  represents arbitrary functions of the arguments determined by the boundary conditions (7) and (9). We then represent the arbitrary functions in a general form as

$$f^{(j)}(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} a_{n,m}^{(j)} \sin(\alpha n) \sin(\beta m), \quad (13)$$

where  $a_{n,m}^{(j)}$  represents arbitrary constants, and the functions  $f_j(\alpha, \beta)$  in the general solutions (12) are equal to

$$f_1(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_{n,m}^{(j)}}{n^4} \sin(\alpha n) \sin(\beta m);$$

$$f_2(\alpha, \beta) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{a_{n,m}^{(2)}}{m^4} \sin(\alpha n) \sin(\beta m). \quad (14)$$

By using particular solutions to problems under given boundary conditions and employing the approximate representations (Morokina et al., 2018: 6566–6570) to determine the unknowns  $a_{n,m}^{(j)}$ , we obtain a homogeneous linear system of algebraic equations. A nontrivial solution of this system leads to a frequency equation, enabling us to determine the natural frequencies of flat elements. The problems related to viscoelastic materials in flat elements are solved in a similar manner.

The concept of a software and hardware complex forms the basis of automated systems for monitoring the state of equipment. This concept has emerged relatively recently in the field of computer technology and fiscal devices. One popular example of a software and hardware complex is "Cruise" with Trace Mode software. "Cruise" is an automated process control system that combines hardware and software components and is designed to implement automatic, automated, and remote control of industrial facilities. The structure of the "Cruise" software and hardware complex is depicted in Figure 2.

The main objectives of creating an automated process control system are as follows:

Ensuring the management of technological processes in normal, emergency, and post-emergency conditions.

Providing operational personnel with sufficient, reliable, and timely information about operating modes, the course of technological processes, equipment conditions, and technical controls.

Optimization of technical and economic indicators.

Increasing the reliability of equipment.

Improving working conditions for operating personnel.

Working with the software and hardware complex involves addressing various tasks such as:

Collecting and primary processing of information.

Monitoring the reliability of received information.

Receiving and storing retrospective information.

Creating process equipment monitoring teams and presenting information to operational and engineering personnel through mnemonic representations, diagrams, graphs, and histograms.

Logging and documentation.

Registering emergency events and analyzing protection actions.

Monitoring and displaying the state of the hardware and software complex.

The complex operates as a distributed control system with a two-level organization, utilizing the standard Ethernet protocol for communication between different system levels. This approach allows for the incorporation of extensive experience in building fault-tolerant systems and leveraging the latest advancements in distributed computing and redundancy.

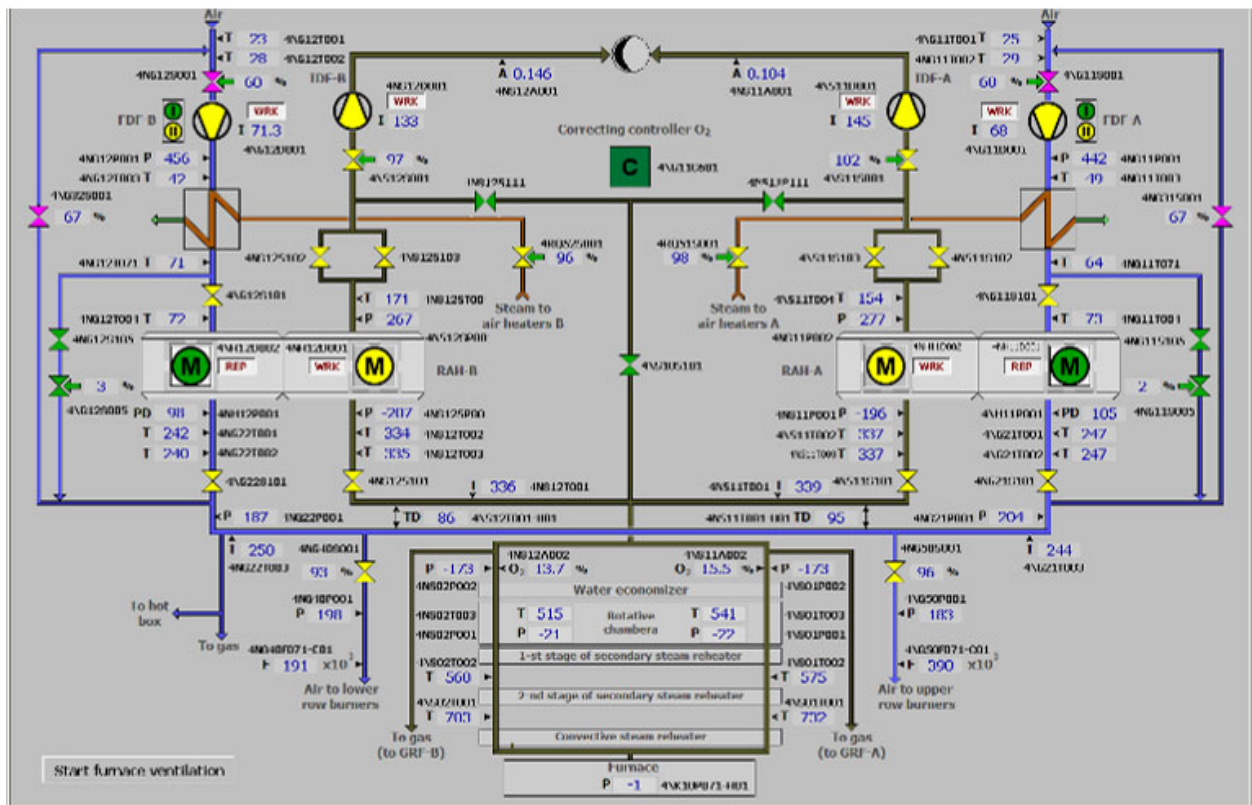


Fig. 2. DCS «Cruise» structure.

Overall, the automated control system represents a decentralized human-machine system in which control tasks are partly performed automatically and partly through remote automated control with human involvement. In urgent cases, emergency tools and individual control keys installed on the backup control system's remote controls can be used for process control. Individual control and monitoring tools are employed to ensure a safe shutdown of equipment in the event of a functional failure of the software and hardware complex. Each level of the process control systems is equipped with corresponding control posts where operational personnel are stationed. Information is generated and displayed automatically by the technical means of the software and hardware complex, while management decisions are made and implemented by the operator. The operator interacts with the control system through the information presentation subsystem (DCS «Крузиз»). Full description of the system [electronic resource] <http://pikzebra.ru/ptk/doc/index.php>.

In Trace Mode 6, the automatic creation and configuration of the channel base for controllers is accompanied by the automatic construction of the operator's graphical interface using monitors. Equipment control algorithms are also selected. Figure 3 illustrates the recording of emergency stops based on technical parameters in Trace Mode. Monitors within the system can generate messages in various situations during the operation of an automated control system. For instance, when a channel value of the FLOAT class exceeds a set limit or when there are changes in employee status. These messages are logged in a dedicated text file called the alarm report (AR), which is configured for each node. AR messages are logged on channels for which the corresponding flag is set. The configuration of the AR allows monitors to generate messages. Message texts for events can be defined in dictionaries. If a channel is linked to a dictionary, messages from the dictionary will be generated; otherwise, monitors will generate default messages. For some channels, the criteria for generating messages are dependent on specific channel parameters. The dictionary can also be configured to transmit messages through additional means, such as SMS messages to a specified mobile phone number via a console network. Graphic

elements used in the development of graphical screens allow operators to input arbitrary messages into the alarm report and view all AR messages, as well as acknowledge them (Gerasimov, 2011: 128).

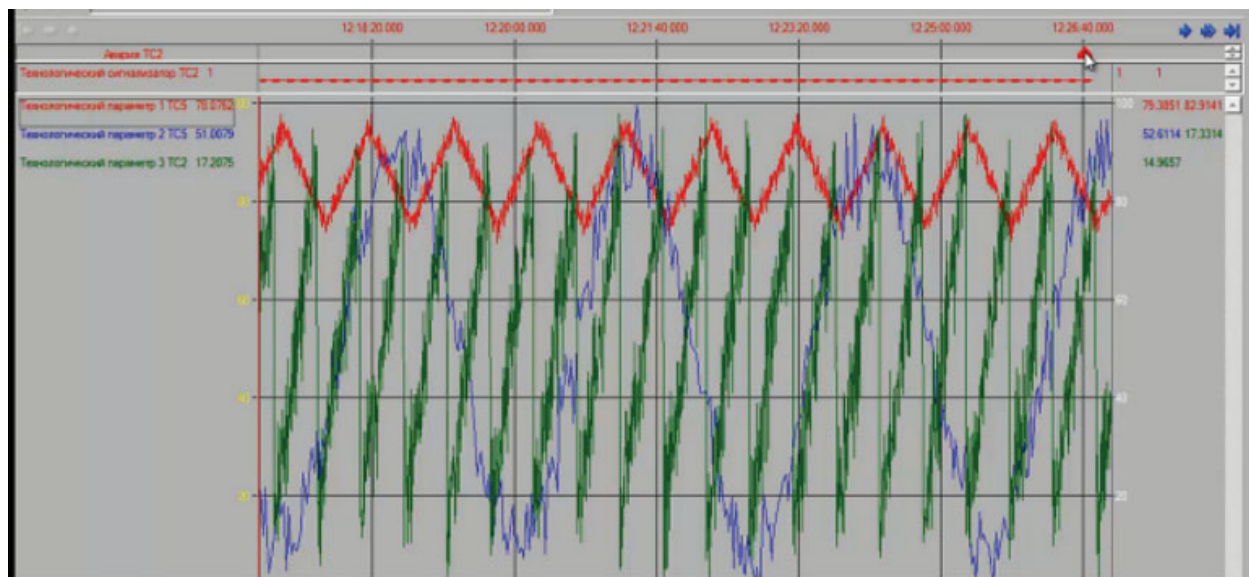


Fig. 3. Registration of emergency stops based on technical parameters in the Trace Mode

To exit the alarm state for a variable, its value must decrease by an amount known as the deadband, such that it falls below the threshold. Similar interpretations apply for lower pre-alarm and emergency alarms. These conditions hold for alarms of the deviation type. The set value of a variable can be modified by either the operator or the program. The alarm is triggered when the variable value exceeds the tolerance limit. Alarms determined by the rate of change of a parameter occur if it exceeds the maximum permissible value or falls below it. The concept of a «deadband» does not apply to alarms of this type (Anokhina, 2004).

### Conclusion

The present study provides a comprehensive analysis of the natural oscillations of planar rectangular elements and the propagation of harmonic waves in both elastic and viscoelastic media, demonstrating the effectiveness of the decomposition method for solving complex boundary value problems. By employing this method, a wide range of free vibration problems were addressed, covering different boundary conditions along element edges and varying material properties. The results highlight the significant influence of viscoelastic parameters, boundary constraints, geometric characteristics, and rheological properties on the dynamic behavior of structural elements.

The objectives and research methods were successfully implemented, leading to several key outcomes. First, the approximate equations of transverse vibrations for planar elastic elements were derived and solved using the decomposition method. This approach provided a systematic framework to decompose the governing fourth-order differential equations into auxiliary problems, allowing the precise determination of natural frequencies. Second, the method was extended to viscoelastic materials, revealing the effect of relaxation times and damping parameters on oscillatory behavior. The obtained frequency curves demonstrate the critical role of viscoelasticity in both stabilizing vibrations and affecting energy dissipation, which is essential for accurate modeling of real-life engineering structures.

Third, the practical applicability of the theoretical framework was demonstrated through the use of the Trace Mode 6 software, which allows automated monitoring of industrial equipment. Numerical simulations performed in this software provide valuable insights into the operational behavior of structural elements, enabling early detection of abnormal conditions, wear, or potential equipment failure. The

integration of theoretical modeling and software-based monitoring illustrates the effectiveness of combining mathematical analysis with practical industrial applications.

The study confirms the initial hypothesis that the decomposition method is a robust and reliable tool for analyzing oscillatory processes in both elastic and viscoelastic media. It enables precise determination of natural frequencies and mode shapes, which are critical for predicting equipment behavior, preventing premature wear, and ensuring operational safety. Furthermore, the results provide a foundation for optimizing design parameters, such as material selection, geometric configuration, and boundary conditions, thereby enhancing durability and reliability while reducing maintenance costs.

This research has significant implications for a broad range of engineering fields, including mechanical engineering, nuclear and hydroelectric power, shipbuilding, aerospace technology, and materials science. The theoretical findings can be applied to improve predictive maintenance strategies, develop automated control systems for monitoring equipment state, and optimize structural design to withstand dynamic loads. Moreover, understanding the interaction of viscoelastic elements with surrounding deformable media has potential applications in geophysics, seismology, and acoustic defect detection, where accurate modeling of wave propagation and energy dissipation is critical.

Future research directions include the extension of the decomposition method to three-dimensional elements and complex structural assemblies under combined thermal, mechanical, and electromagnetic effects. The development of integrated computational models that couple oscillation analysis with real-time monitoring data will enhance predictive maintenance capabilities and industrial process optimization. Additionally, further investigation into nonlinear behavior, multi-scale effects, and advanced viscoelastic material models will contribute to a deeper understanding of structural dynamics under operational conditions.

In conclusion, the present study successfully demonstrates that rigorous mathematical methods, such as the decomposition method, combined with numerical and software-based tools, provide an effective and practical approach to analyzing oscillatory processes in elastic and viscoelastic elements. The results not only confirm theoretical expectations but also offer practical guidelines for improving equipment reliability, prolonging service life, and optimizing industrial operations. This work represents a significant contribution to the field of deformable media dynamics and provides a foundation for further scientific exploration and technological advancement.

## REFERENCES

- Anokhina, 2004 — Anokhina T. Selection and comparison of SCADA-system. — Moscow. — 2004. [Eng.]
- Bondareva, 2010 — Bondareva G.E. Improving the scientific justification and industrial foundation of automated technological processes to increase the durability of the working elements of technological equipment: monograph. — M.: PHGNU «RusInformAgroTech». — 2010. — 242 p. [Eng.]
- Mailybayev, 2020 — Mailybayev E., Umbetov U., Seitmuratov A., Shnykulova A. Analysis of Oscillatory Processes in Elastic and Viscoelastic Media and Structural Elements to Predict Equipment Shutdown // *Advanced Materials and Technologies*. — 2020. — Issue 1 (17). — Pp. 36–42. [Eng.]
- Gerasimov, 2011 — Gerasimov A.V. SCADA system TraceMode 6. — Kazan. — 2011. — Pp. 128. [Eng.]
- Morokina, 2019 — Morokina G. Computer-Aided Design Systems of Decentralization on the Base of Trace Mode in the Industry // *2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. — 2019. — Pp. 1–5. [Eng.]
- Mailybayev, 2019 — Mailybayev E., Umbetov U. Building fault-tolerant decentralized systems // *«Izvestie» KGTU after I. Razzakova Tekhnika*. — 2019. — № 2 (50). — Part 1. — Pp. 100–104. [Eng.]
- Minakov, 2009 — Minakov A.A., Fedoseev D.V. Equipment diagnostics using process control parameters. — Samara. — 2009. — Pp. 303–305. [Eng.]
- Morokina, 2018 — Morokina G.S., Katsan I.F., Umbetov U. Control systems on the base of TM6 in industry // *Proceedings of the 31st International Business Information Management Association Conference, IBIMA*. — 2018. — Pp. 6566–6570. [Eng.]
- Pshenichnov, 1985 — Pshenichnov G.E. Decomposition method for the regeneration of equations and boundary value problems. — M.: DAN USSR, 1985. — T. 182. — № 4. — P. 792–794. [Eng.]
- Pshenichnov, 1986 — Pshenichnov G.E. Solving some problems of structural mechanics by the decomposition method // *Structural Mechanics and Structural Analysis*. — 1986. — № 4. — Pp. 12–17. [Eng.]
- Seitmuratov, 2007 — Seitmuratov A.Gh. Approximate method for solving dynamic problems for linear viscoelastic media. // *News MGTU Mechanical Engineering*. — 2007. — № 11. — Pp. 9–15. [Eng.]



---

---

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

Industrial Transport of Kazakhstan  
ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 21. Is. 4. Number 84 (2024). Pp. 54–69  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.005>  
UDC 656.2

## EFFICIENCY OF HANDLING PERISHABLE GOODS IN THE TRANSPORTATION PROCESS

*K.A. Gibadullin<sup>1\*</sup>, Mukhindi Mose<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan;

<sup>2</sup>State Yangtze University of engineering and technology, Hubei, China.

E-mail: [gibadullin.kayum@mtgu.edu.kz](mailto:gibadullin.kayum@mtgu.edu.kz)

**Kayum Gibadullin** — master student, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [gibadullin.kayum@mtgu.edu.kz](mailto:gibadullin.kayum@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0005-2650-3196>;

**Mukhindi Mose** — senior lecturer, State Yangtze University of engineering and technology, Hubei, China

E-mail: [muhindimozeh1@gmail.com](mailto:muhindimozeh1@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0000-2190-9107>.

© K.A. Gibadullin, Mukhindi Mose

**Abstract.** This study investigates the impact of storage and transportation conditions on the quality of meat products. The relevance of the research is determined by the need to ensure the safety and consumer properties of products, given the insufficient study of the combined effects of microbiological, chemical, and physical factors. The aim of the study is to identify the main factors affecting the quality of meat products and to develop a set of control methods that allow reliable assessment of product shelf life and safety. The following objectives were set to achieve this aim: characterization of the studied materials, identification of quality deterioration factors, development of a comprehensive methodology for microbiological, chemical, and organoleptic analysis, experimental research, and formulation of recommendations for optimizing storage and transportation conditions. The results showed that the quality deterioration of meat products is caused by the combined influence of microbiological, chemical, and physical factors. The proposed control methods allowed for accurate determination of shelf life and assessment of consumer properties. The conclusion confirms the proposed hypothesis regarding the necessity of a comprehensive approach to quality control of meat products. The practical significance lies in the possibility of applying the results in the food industry to improve safety, maintain product quality, and minimize losses during storage and transportation.

**Keywords:** meat products, quality, microbiological control, chemical analysis, storage, transportation.

**For citation:** K.A. Gibadullin, Mukhindi Mose. Efficiency of Handling Perishable Goods in the Transportation Process//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 84. Pp. 54–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.005>.

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

## ТАСЫМАЛДАУ БАРЫСЫНДА ТЕЗ БҰЗЫЛАТЫН ЖҮКТЕРДІ ӨНДЕУ ҮДЕРІСІНІҢ ТИІМДІЛІГІ

*К.А. Гибадуллин<sup>1\*</sup>, Мухинди Мозе<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан;

<sup>2</sup>Мемлекеттік Янцзы инженерлік және технологиялық университеті, Хубэй, Қытай.

E-mail: [gibadullin.kayum@mtgu.edu.kz](mailto:gibadullin.kayum@mtgu.edu.kz)

**Каюм Гибадуллин** — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz](mailto:seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0005-2650-3196>;

**Мухинди Мозе** — аға оқытушы, Мемлекеттік Янцзы инженерлік және технологиялық университеті, Хубэй, Қытай

E-mail: [muhindimozeh1@gmail.com](mailto:muhindimozeh1@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0000-2190-9107>.

© К.А. Гибадуллин, Мухинди Мозе

**Аннотация.** Бұл жұмыста ет өнімдерінің сапасына сақтау және тасымалдау жағдайларының әсері қарастырылады. Зерттеудің өзектілігі өнімдердің қауіпсіздігі мен тұтынушылық қасиеттерін қамтамасыз ету қажеттілігімен анықталады, өйткені микробиологиялық, химиялық және физикалық факторлардың бірлескен әсері жеткілікті зерттелмеген. Зерттеудің мақсаты – ет өнімдерінің сапасына әсер ететін негізгі факторларды анықтау және өнімнің сақтау мерзімін және қауіпсіздігін сенімді бағалауға мүмкіндік беретін бақылау әдістерін кешенді түрде әзірлеу. Мақсатқа жету үшін қойылған міндеттер: зерттелетін материалды сипаттау, сапаның төмендеу факторларын анықтау, микробиологиялық, химиялық және органолептикалық көрсеткіштерді кешенді талдау әдістемесін әзірлеу, тәжірибелік зерттеулер жүргізу және сақтау мен тасымалдау жағдайларын оңтайландыру бойынша ұсыныстар жасау. Зерттеу нәтижелері көрсеткендей, ет өнімдерінің сапасының төмендеуі микробиологиялық, химиялық және физикалық факторлардың бірлескен әсерінен туындайды. Ұсынылған бақылау әдістері өнімнің сақтау мерзімін дәл анықтауға және оның тұтынушылық қасиеттерін бағалауға мүмкіндік берді. Қорытындысы зерттеу барысында ұсынылған гипотеза ет өнімдерінің сапасын бақылауда кешенді тәсіл қажет екенін растайды. Практикалық маңызы – нәтижелерді тамақ өнеркәсібінде қолдану арқылы қауіпсіздікті арттыру, өнім сапасын сақтау және сақтау мен тасымалдау кезінде шығындарды азайтуға мүмкіндік беруінде.

**Түйін сөздер:** ет өнімдері, сапа, микробиологиялық бақылау, химиялық талдау, сақтау, тасымалдау

**Дәйексөздер үшін:** К.А. Гибадуллин, Мухинди Мозе. Тасымалдау барысында тез бұзылатын жүктерді өңдеу үдерісінің тиімділігі//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 84. 54–69 бет. (Орыс. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.005>.

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



## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ

*К.А. Гибадуллин<sup>1\*</sup>, Мухинди Мозе<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан;

<sup>2</sup>Государственный инженерно-технологический университет Янцзы, Хубэй, Китай.

E-mail: gibadullin.kayum@mtgu.edu.kz

**Каюм Гибадуллин** — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0005-2650-3196>;

**Мухинди Мозе** — старший преподаватель, государственный инженерно-технологический университет Янцзы, Хубэй, Китай

E-mail: muhindimozeh1@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-2190-9107>.

© К.А. Гибадуллин, Мухинди Мозе

**Аннотация.** В данной работе рассматривается влияние условий хранения и транспортировки на качество мясной продукции. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности и потребительских свойств продукции, учитывая недостаточную изученность комплексного воздействия микробиологических, химических и физических факторов. Цель исследования – изучить основные факторы, влияющие на изменение качества мясной продукции, и разработать комплекс методов контроля, позволяющих достоверно оценивать сроки годности и безопасность продуктов. Для достижения цели были поставлены следующие задачи: характеристика исследуемого материала, выявление факторов ухудшения качества, разработка методики комплексного анализа микробиологических, химических и органолептических показателей, проведение экспериментальных исследований и формулировка рекомендаций по оптимизации условий хранения и транспортировки. Результаты исследования показали, что ухудшение качества мясной продукции обусловлено совокупным воздействием микробиологических, химических и физических факторов. Предложенные методы контроля позволили достоверно определить сроки годности продукции и оценить её потребительские свойства. Заключение исследования подтверждает выдвинутую гипотезу о необходимости комплексного подхода к контролю качества мясной продукции. Практическое значение работы заключается в возможности применения результатов на предприятиях пищевой промышленности для повышения безопасности, сохранения качества продукции и минимизации потерь при хранении и транспортировке.

**Ключевые слова:** мясная продукция, качество, микробиологический контроль, химический анализ, хранение, транспортировка

**Для цитирования:** К.А. Гибадуллин, Мухинди Мозе. Эффективность процесса обработки скоропортящихся грузов при перевозке//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. №. 84. Стр. 54–69. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.005>.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Введение

Выбор темы исследования обусловлен необходимостью изучения влияния условий хранения и транспортировки на качество мясной продукции, что является актуальной проблемой современной пищевой промышленности. Анализ существующих исследований показывает, что несмотря на большое количество работ по микробиологическому и химическому контролю мясных продуктов, многие аспекты изменения их качества при

длительном хранении и транспортировке остаются недостаточно изученными. Особенно это касается комплексной оценки воздействия физических, химических и микробиологических факторов, а также применения современных методов контроля в условиях реального производства. Наличие этих пробелов и актуальность обеспечения безопасности и потребительских свойств продукции обосновывают выбор данной темы.

Актуальность темы определяется высокой значимостью проблемы в контексте обеспечения качества и безопасности мясной продукции для потребителей. На сегодняшний день увеличиваются требования к срокам хранения, к условиям транспортировки и к системе контроля качества на предприятиях мясной промышленности. Однако существующие стандарты и методики не всегда позволяют достоверно оценивать комбинированное влияние микробиологических, химических и органолептических факторов, что создает риски снижения качества и безопасности продукции. Следовательно, разработка и апробация комплексных методов контроля качества является теоретически и практически значимой задачей.

Объектом исследования является мясная продукция, включая полуфабрикаты и готовые продукты. Предметом исследования выступают процессы изменения микробиологического, химического и органолептического состояния продукции в условиях хранения и транспортировки.

Цель исследования заключается в изучении факторов, влияющих на изменение качества мясной продукции, и разработке комплекса методов контроля, позволяющих достоверно оценивать сроки годности и безопасность продуктов.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- провести отбор и характеристику исследуемого материала в количественном и качественном аспектах;
- определить основные факторы, влияющие на ухудшение качества продукции;
- разработать методику комплексного анализа микробиологических, химических и органолептических показателей;
- провести экспериментальные исследования с целью проверки эффективности предложенных методов контроля;
- сформулировать рекомендации по оптимизации условий хранения и транспортировки мясной продукции.

В качестве методов исследования использованы: микробиологические и химические анализы, органолептическая оценка качества продукции, статистическая обработка данных, а также сравнительный анализ результатов экспериментов. Используются как стандартные методики контроля, так и альтернативные подходы, позволяющие выявить новые закономерности изменения качества продукции.

Гипотеза исследования заключается в том, что ухудшение качества мясной продукции обусловлено совокупным воздействием микробиологических, химических и физических факторов, и применение комплексных методов контроля позволит более достоверно прогнозировать сроки годности и потребительские свойства продукции.

Научное и практическое значение исследования заключается в возможности применения полученных результатов для совершенствования систем контроля качества и безопасности мясной продукции на предприятиях пищевой промышленности, повышения потребительской ценности продукции и минимизации потерь при хранении и транспортировке.

#### **Материалы и методы**

Объектами исследования являлись мясные продукты, включая:

Охлажденные полуфабрикаты из мяса птицы (филе и голень цыпленка-бройлера) в вакуумной упаковке;

Готовые к употреблению продукты: мясосодержащие сосиски (вакуум), детские вареные сосиски (ГМС), утиный паштет (герметичная упаковка).

Выбор объектов обусловлен их скоропортящейся природой, возможностью механических воздействий и кратковременными нарушениями условий хранения в процессе транспортировки. Характеристика материала представлена качественно и количественно (дата изготовления, нормативно-техническая документация, срок годности при хранении при температуре  $(2 \pm 2)^\circ\text{C}$ ).

Вопросы исследования:

- Как изменение условий хранения и транспортировки влияет на микробиологическую и органолептическую стабильность продукции?

- Какие химические и физические факторы способствуют ухудшению качества при хранении?

- Как верификация сроков годности стандартной и альтернативной программами исследований отражает устойчивость продукции к порче?

Органолептическое ухудшение качества мясных продуктов в период хранения определяется не только микробиологическими, но и химическими и физическими факторами, а их учет верификационными методами позволяет точнее определять реальные сроки годности.

Этапы исследования:

- отбор продукции в розничной торговле согласно СТБ ГОСТ Р 51447–2001;  
- разработка программ исследований: стандартной (для полуфабрикатов) и альтернативной (для готовых продуктов с контролем окислительной порчи);

- определение контрольных показателей в начале, середине и конце хранения;

- мониторинг условий хранения (температура, влажность);

- анализ динамики показателей и сопоставление с нормативами;

- вывод о факторах порчи и оценка соответствия продукции требованиям.

Методы исследования:

- Микробиологические: КМАиФАНМ, *Listeria monocytogenes*, сальмонеллы, БГКП (ГОСТы 7702.2.1–2017, 10444.15–94, 32031–2012, 31468–2012, 31659–2012, 31747–2012);

- Органолептические: оценка цвета, запаха, консистенции и поверхности по 5-балльной шкале;

- Химические: кислотное и перекисное число жира (ГОСТ Р 55480–2013, ГОСТ 34118–2017);

- Физико-химические: активность воды ( $A_w$ , ГОСТ ISO 21807–2015), контроль температуры хранения;

- Статистический анализ: обработка динамики изменений показателей, расчет сроков хранения с использованием коэффициентов резерва.

Выбранные образцы хранились при условиях, рекомендованных производителем. Контроль проводился каждые 24 часа для полуфабрикатов и на начальном, среднем и конечном сроках хранения для готовых продуктов. Оценивались микробиологические, органолептические и химические показатели, выявлялись причины снижения качества и оценивалось соответствие продукции установленным стандартам.

### **Результаты и обсуждение**

Практика закупок «Эйр Астана» реализует прозрачные и эффективные процедуры закупок, основанные на передовой международной практике. Наша цепочка поставок опирается на широкую базу поставщиков, что позволяет удовлетворять потребности в качественных товарах и услугах для операционной деятельности.

В процессе закупок Группа старается привлекать организации, которые нанимают людей с ограниченными возможностями. В этом году Группа заключила договоры на

изготовление печатной продукции и средств индивидуальной защиты с организациями, в которых заняты люди с ограниченными возможностями.

Закупочные процедуры осуществляются строго в соответствии с установленными правилами через портал электронных закупок АО «Фонд национального благосостояния «Самрук-Казына» (Абдуллаева, 2017: 350–358).

Группа включает в договоры со всеми поставщиками антикоррупционные оговорки. В 2021 году эти положения были расширены и теперь включают требования о соблюдении поставщиками деловой этики наряду с положениями о надежности. Закрытие большого количества маршрутов и сокращение объема импорта в Казахстан отрицательно сказалось на цепочках поставок Группы.

Таблица 1. Информация о закупках у местных поставщиков

	2022	2021	2020
Общее количество договоров с местными поставщиками	2591	1394	1905
Общая стоимость договоров с местными поставщиками (тыс. долл. США)	239571	226664	275500
Процентная доля закупочного бюджета в значимых точках присутствия, приходящаяся на местных поставщиков (процентная доля продуктов и услуг, закупаемых на местном рынке)	22 %	27 %	36 %

Все пищевые продукты состоят из первичных биоматериалов, которые со временем неизбежно разлагаются и портятся. Порча является причиной возникновения проблем пищевой безопасности, когда продукт может вызвать заболевание и даже смерть потребителя.

Менее серьезные случаи порчи могут проявляться в ухудшении цвета, вкуса и аромата продукта до такой степени, что он является неприемлемым. Процессы, приводящие к порче пищевых продуктов, могут быть классифицированы по трем основным типам: микробиологические, химические и физические. Несомненно, между этими тремя видами существует некоторая корреляция (Полуфабрикаты натуральные из мяса птицы, 2011: 1–25).

Особое внимание и со стороны производителей, и специалистов в области гигиены всегда уделялось именно микробиологической порче. Микроорганизмы попадают в пищевой продукт на любой стадии технологической цепи. Способность к развитию тех или иных микроорганизмов определяется их видом, самим продуктом и условиями окружающей среды, т.е. созданием специфических условий – наличие питательных веществ, активность воды, pH, температура и присутствие кислорода (Абдуллаева, 2017: 350–358).

Современные пищевые технологии используют широкий спектр методов и способов, позволяющих свести к минимуму микробную контаминацию сырья/полуфабрикатов в процессе производства и возможность развития микрофлоры в готовом продукте: высокие гигиенические стандарты для предприятий, разнообразие средств и добавок антимикробного действия, современные способы упаковки с регулируемым газовым составом и др. (Показатели безопасности и безвредности для человека продовольственного сырья и пищевых продуктов, 2013: 1–28).

Следующей причиной порчи пищевых продуктов являются химические реакции или реакции деградации их химических компонентов – белков, жиров и углеводов. Скорость этих реакций также зависит от воздействия активности воды, температуры хранения, pH, освещения или присутствия кислорода. (Колодязная, 2019: 10–138).

Продукты химических реакций влияют на цвет, вкус, аромат и/или текстуру пищевого продукта. Несмотря на имеющуюся серьезную теоретическую базу в данной области, вопрос качества протекающих химических реакций и количества образующихся в результате продуктов постоянно остается открытым ввиду многокомпонентности современных рецептур, использования различных влагоудерживающих добавок, противомикробных веществ и др., применения современных способов технологической обработки сырья и упаковки готовой продукции (Показатели безопасности и безвредности для человека продовольственного сырья и пищевых продуктов, 2013: 1–28). Например, при обработке мяса птицы или переработке различных видов мяса в настоящее время используется большой спектр добавок, способствующих повышению качества и обеспечению безопасности готового продукта за счет снижения активности воды, регулирования pH и др.

Основные компоненты данных составов (добавок, технологических вспомогательных средств) – различные органические кислоты, с одной стороны, оказывают антимикробное действие а с другой – могут способствовать окислению жировой составляющей продукта, что может приводить к химической порче (Показатели безопасности и безвредности для человека продовольственного сырья и пищевых продуктов, 2013: 1–28; Колодязная, 2019: 10–138).

Порча третьего типа – физическая – происходит вследствие структурных изменений или структурной нестабильности пищевых продуктов. К ней относят, например, механические повреждения. Различные изменения физической природы могут интенсифицировать ферментативные реакции, способствовать размножению микроорганизмов, влиять на миграцию влаги в пищевом продукте или массообмен его компонентов. Особую актуальность эта проблема имеет для современного пищевого бизнеса, целью которого является увеличение рынков сбыта и поиск потребителей, в том числе и далеко за пределами своей страны.

Реализация продукции сегодня – это многостадийные логистические процессы, при которых операции погрузки/разгрузки повторяются свыше 10 раз. Это приводит к непреднамеренному кратковременному нарушению установленных условий хранения продукции, что в результате может стать причиной физической, а впоследствии и химической порчи пищевого продукта. Вместе с тем при определении сроков годности пищевых продуктов в лабораторном эксперименте создают такие условия хранения и задают такую продолжительность испытаний, которые установлены действующими техническими нормативными правовыми актами и содержатся в информации, выносимой на маркировку производителем.

Установленный таким образом срок годности будет актуален в случае доставки продукции от предприятия-изготовителя непосредственно к точке ее реализации, включая максимально две погрузочно-разгрузочные операции. Следует обратить внимание и на перечень исследуемых характеристик при оценке сроков годности.

В соответствии с требованиями программа лабораторных исследований для установления или продления сроков годности формируется исходя из значения активности воды ( $A_w$ ) конкретного вида продукции. Для мяса птицы и продуктов из мяса – это органолептические и микробиологические показатели. Кроме того, в пищевых продуктах с содержанием жира более 5 % обязательным является контроль окисления жирового компонента (Абдуллаева, 2017: 350–358).

Однако критерии для оценки последних отсутствуют: нормативы показателей окислительной порчи для мясных продуктов не регламентированы. Следовательно, заключение по срокам годности, содержащее обоснованные выводы с критериями оценки, можно выдать только на основании двух групп показателей – органолептических и микробиологических. Учитывая вышесказанное, целью данной работы являлась

верификация сроков годности некоторых образцов продукции из мяса птицы и мясной продукции, отобранных в организациях розничной торговли, с применением стандартной и альтернативной программ исследований.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- обоснован выбор объектов исследований;
- разработаны программы исследований для различных видов исследуемых образцов;
- определены критерии для оценки соответствия образцов продукции в ходе исследований;
- изучена динамика оцениваемых показателей в течение срока годности образцов продукции с учетом коэффициентов резерва.

Объекты, материалы и методы исследования. Объектами исследований являлись мясные продукты – охлажденные полуфабрикаты натуральные из мяса птицы в вакуумной упаковке (филе и голень цыпленка бройлера), а также готовые к употреблению и упакованные в герметичную потребительскую упаковку: сосиски мясо содержащие (упакованные под вакуумом), сосиски детские вареные (упаковка в ГМС) и паштет утиный, характеристика которых приведена в таблице 2.

Выбор данных объектов был обусловлен следующими причинами:

- 1) возможностью механических воздействий (вибрации) на продукцию в процессе ее транспортировки;
- 2) высокой вероятностью кратковременных нарушений условий хранения в процессе транспортировки продукции.

Отбор проб продукции выполняли в соответствии с СТБ ГОСТ Р 51447–2001 в организациях розничной торговли, поставка товаров в которые осуществляется из логистических центров.

План испытаний для верификации сроков годности составляли с учетом требований и ГОСТ ISO 16779–2017 (п. 4.4). Продолжительность исследования для особо скоропортящихся продуктов (образцов 1 и 2) устанавливали с учетом коэффициента резерва, равного 1,5. План эксперимента показан на рисунок 1 (Air Astana, 2022: 17–162).

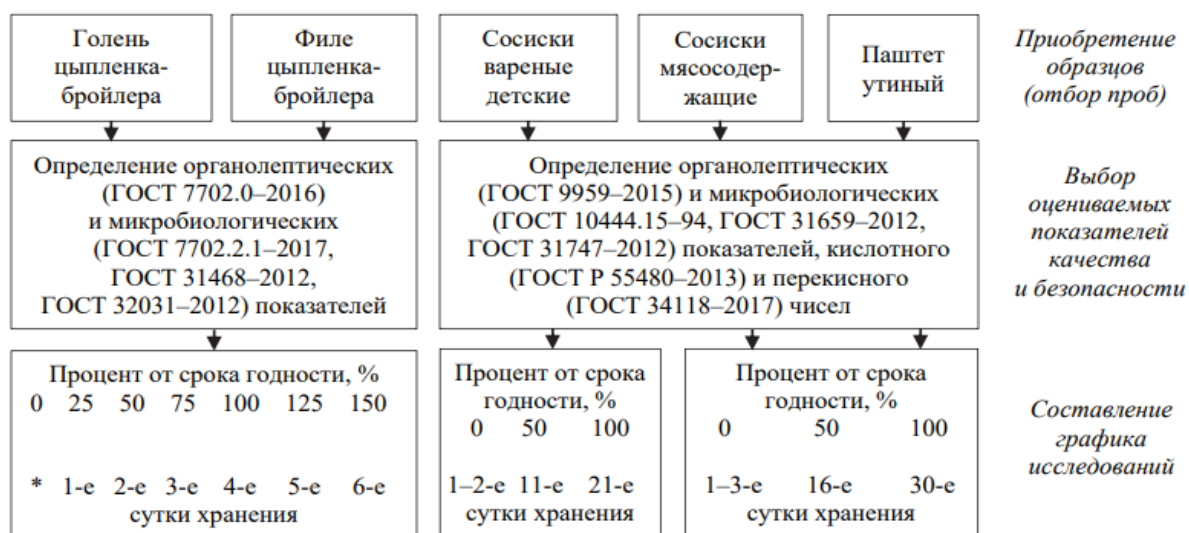


Рис. 1. Схема исследований

Стандартная программа исследований использовалась для образцов 1 и 2 и включала изучение динамики микробиологически и органолептических показателей. Временем начала эксперимента являлось окончание последней технологической операции производства полуфабрикатов таблица 2.

В дальнейшем отбор проб для определения контролируемых показателей осуществляли через каждые 24 ч.

Альтернативная программа исследований была разработана для образцов 3–5, в рамках которой дополнительно к количественной оценке микробиоты и органолептических характеристик в период срока годности изучали динамику показателей окислительной порчи – кислотное и перекисное числа.

Период доставки образцов в торговую сеть не превышал 1–3 суток после окончания технологического цикла, что и являлось временем начала эксперимента. Контролируемые показатели также были оценены в середине и конце срока годности образцов мясных продуктов.

Уменьшение точек отбора в сравнении с полуфабрикатами было обусловлено наибольшей устойчивостью к порче термически обработанных продуктов рисунок 1. На первом этапе исследований (в точке 0 % от срока годности) в дополнение к указанным показателям во всех образцах определяли активность воды по ГОСТ ISO 21807–2015.

Таблица 2. Характеристика объектов исследования

Образец	Продукция	ТНПА на продукцию	Дата изготовления	Срок годности при температуре (2 ± 2)°С, сут		
1	Филе цыпленка-бройлера охлажденное в вакуумной упаковке					
2	Голень цыпленка-бройлера охлажденная в вакуумной упаковке					
3	Сосиски мясосодержащие				17.11.2021	30
4	Сосиски вареные детские				21.11.2021	21
5	Паштет утиный				21.11.2021	30

Определение количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов проводили по ГОСТ 7702.2.1–2017 и ГОСТ 10444.15–94, бактерий *Listeria monocytogenes* - в соответствии с ГОСТ 32031–2012, сальмонелл - по ГОСТ 31468–2012 и ГОСТ 31659–2012, БГКП - согласно ГОСТ 31747–2012.

Органолептическая оценка образцов 1 и 2 выполнялась с применением 5-балльных шкал, разработанных автором, по следующим показателям: цвет, запах, консистенция и состояние поверхности таблице 3.

При этом оценка в 1 и 2 балла соответствует неприемлемому качеству, т.е. полуфабрикат считается не годным к употреблению.

Оценка в 3 балла отвечает удовлетворительному качеству, и такой продукт можно употреблять, однако он не соответствует ожиданиям потребителя.

Оценка в 4 балла — это хорошее качество и 5 - отличное.

Оценку окислительной порчи образцов 3-5 осуществляли согласно ГОСТ Р 55480–2013 (кислотное число) и ГОСТ 34118–2017 (перекисное число). Результаты исследования. В процессе проведения исследований на всех этапах эксперимента проводился мониторинг температуры хранения всех образцов, в ходе которого было подтверждено выполнение рекомендаций изготовителя к условиям хранения продукции – (2 ± 2)°С.

Таблица 3. Балльная шкала оценки полуфабрикатов из мяса курицы

Показатель	Характеристика		Балл
	реальная оценка	органолептическая оценка	
	Розовый, равномерный (кожа – бледно-желтая)	Розовый, равномерный	5
	Светло-розовый, неравномерный (кожа – бледно-желтая)	Светло-розовый, неравномерный	4

	Темно-розовый, неравномерный (кожа – с оттенками других цветов)	Темно-розовый, неравномерный	3
	От светло-до темно-розового, с оттенками другого цвета (серый, зеленый, желтый)		2
	Серый/желтый/зеленый/наличие крови		1
	Характерный, приятный, свежего мяса, без постороннего запаха		5
	Характерный, но менее осязаемый, без постороннего запаха		4
	Слабый, не ощущается запах свежего мяса, посторонний запах отсутствует		3
	Несвежий, с наличием слабого неприятного запаха		2
	Испорченный, аммиачный, гнилостный, резкий		
	Плотная, упругая, хорошо держится на кости	Плотная, упругая	5
	Плотная, менее упругая		4
	Однородная, менее плотная, есть жидкость, плохо держится на кости	Однородная, менее плотная, есть жидкость	3
	Рыхлая, слабая, с жидкостью		2
	Рыхлая, разваливающаяся, покрытая слизью		1

Результаты определения активности воды и показателей микробиологической безопасности в исследуемых образцах на начальном этапе срока годности приведены в таблице 4.

Из таблицы 3 видно, что показатель активности воды принимал высокие значения в интервале 0,91–0,99, что характерно для необработанного сырого мяса птицы и продуктов переработки мяса и подтверждает принадлежность к группе скоропортящихся пищевых продуктов. Значения микробиологических показателей не превышали нормативы безопасности, установленные соответствующими регламентами (ТР ТС 034/2013, ТР ТС 021/2011, ТР ЕАЭС 051/2021).

Таблица 4. Результаты определения активности воды и микробиологических показателей в исследуемых образцах на начальном этапе хранения (0 % от срока годности)

Показатель, ед. Изм	Значение показателя						
	для охлажденных полуфабрикатов из мяса птицы			для готовых мясных продуктов			
	фактическое			фактическое			
	филе	голень		сосиски мясосодержащие	сосиски вареные детские	паштет утиный	
Активность воды	0,951	0,967	-	0,989	0,985	0,982	-
КМАиФАиМ КОЕ/г	1,8*10 <sup>1</sup>	2,9*10 <sup>1</sup>	5,0*10 <sup>5</sup>	9,0*10 <sup>1</sup>	7,8*10 <sup>1</sup>	6,2*10 <sup>1</sup>	1,0*10 <sup>3</sup> (сосиски) 2,0*10 <sup>3</sup> (паштет)
Listeria monocytogenes	Не обнаружено		-	-	-	-	-
Патогенные, в том числе сальмонеллы	Не обнаружено		-	-	-	-	-
БГКП	-	-	-	Не обнаружено			Не допускается

При изучении динамики микробиологических показателей на протяжении всего периода верификационного эксперимента (6 сут для образцов 1 и 2, 21–30 сут – для образцов 3–5) была отмечена тенденция к увеличению КМАиФАиМ таблица 5. При этом в образцах охлажденных полуфабрикатов данные микроорганизмы накапливались в большей степени, нежели в термически обработанных продуктах и к концу исследованного периода хранения достигли величин в диапазоне (0,9–3,1) \* 10<sup>5</sup>.

Таблица 5. Результаты исследования изменения КМАиФАНМ в течение периода испытаний

Продукция	КМАиФАНМ (КОЕ/г) на этапах эксперимента, % от срока годности						
	0	25	50	75	100	125	150
Филе	$1,8 \cdot 10^1$	$7,5 \cdot 10^1$	$2,1 \cdot 10^2$	$6,9 \cdot 10^2$	$3,6 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^5$
Голень	$2,9 \cdot 10^1$	$9,3 \cdot 10^1$	$4,8 \cdot 10^2$	$9,1 \cdot 10^2$	$7,8 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^4$	$0,9 \cdot 10^5$
Сосиски мясосо- держащие	$9,0 \cdot 10^1$	–	$2,8 \cdot 10^2$	–	$4,1 \cdot 10^2$	–	–
Сосиски вареные детские	$7,8 \cdot 10^1$	–	$2,6 \cdot 10^2$	–	$3,8 \cdot 10^2$	–	–
Паштет утиный	$6,2 \cdot 10^1$	–	$2,4 \cdot 10^2$	–	$4,2 \cdot 10^2$	–	–

Однако превышение регламентируемого норматива (не более  $5 \cdot 10^5$  КОЕ в 1 г) не было достигнуто даже на 6-е сутки хранения продукции. Аналогичные результаты были получены и при количественной оценке микробиоты термически обработанных продуктов. Тенденция по увеличению КМАиФАНМ не обнаружила превышения действующего норматива для рассматриваемых объектов исследования –  $1 \cdot 10^3$  для сосисок (ТР ТС 034/2013) и  $2 \cdot 10^3$  для паштета утиного (ТР ТС 021/2011).

Другая ситуация наблюдалась при органолептической оценке исследуемых образцов полуфабрикатов и готовой к употреблению мясной продукции таблице 6, рисунок 2–3.

Так, все органолептические показатели образцов сосисок и паштета в течение всего периода испытаний ухудшались, и к концу эксперимента было обнаружено выделение влаги, мягкая консистенция и слегка кислый запах во всех исследованных пробах таблица 6.

Таблица 6. Результаты исследований органолептических характеристик термически обработанных образцов продукции

Точки контроля	Органолептические характеристики		
	консистенция	внешний вид	запах и вкус
<b>Сосиски мясосо- держащие</b>			
0% от срока годности	Плотная, упругая	Сухая поверхность	Ярко выраженный
50% от срока годности	Менее упругая	Слегка увлажненная поверхность	Менее выраженный
100% от срока годности	Мягкая	Увлажненная поверхность	Кислое послевкусие
<b>Сосиски вареные детские</b>			
0% от срока годности	Упругая	Сухая поверхность	Ярко выраженный
50% от срока годности	Менее упругая	Слегка увлажненная поверхность	Менее выраженный
100% от срока годности	Мягкая	Увлажненная поверхность	Кислое послевкусие
<b>Паштет утиный</b>			
0% от срока годности	Нежная мажущаяся	Сухая поверхность	Ярко выраженный
50% от срока годности	Нежная мажущаяся	Слегка увлажненная поверхность	Менее выраженный
100% от срока годности	Мажущаяся, наличие свободной влаги	Увлажненная поверхность	Кислое послевкусие

В полуфабрикатах из мяса птицы также постепенно ухудшались все органолептические показатели – запах, цвет, консистенция голени и филе рисунки 2–3.

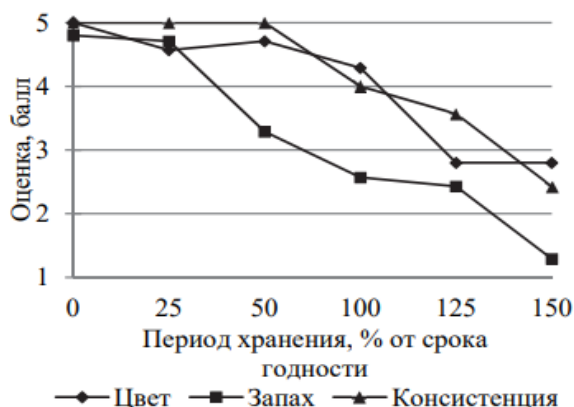


Рис. 2. Изменение органолептических показателей голени при хранении

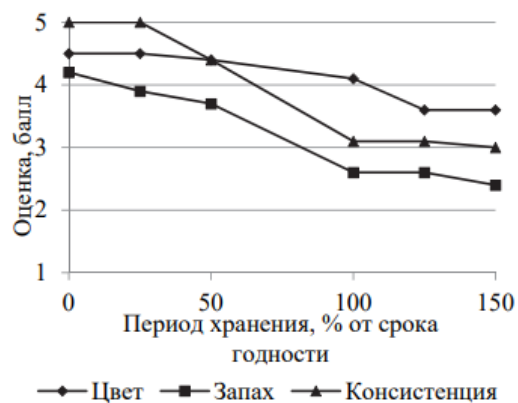


Рис. 3. Изменение органолептических показателей филе при хранении

Как видно из представленных на рисунках 2–3 данных, неприемлемое качество продукции (оценка менее 3 баллов) было обнаружено на 4-е сутки хранения. А среднее качество, которое влияет на потребительскую оценку, наблюдалось, начиная с 3-х суток хранения для филе и со 2-х для голени. Следует отметить, что запах оказался критическим показателем для голени, которая относится к мясокостным полуфабрикатам и более подвержена биохимическим изменениям в области, близлежащей к кости.

Его значительное ухудшение было отмечено уже со 2-х суток хранения (3,3 балла) и достигло к концу исследованного периода значения в 1,3 балла, что делает продукт непригодным к употреблению. Таким образом, в ходе изучения динамики контролируемых показателей в полуфабрикатах было обнаружено существенное снижение именно органолептических характеристик. При этом в ходе лабораторного эксперимента не было подтверждено (табл. 4), что развитие микробиоты являлось ее основной причиной. Следовательно, можно сделать вывод о наличии источников (факторов) химической порчи, способствующих ухудшению органолептических свойств продукции.

Одним из таких факторов являются продукты химических превращений, а именно, разложения органических кислот (например, молочной) и их солей, входящих в состав используемых пищевых добавок и участвующих в окислении жировой составляющей продукта (Behdani, 2019: 67–183; Годовой отчет А «Международный аэропорт Алматы», 2020: 15–168).

Исходя из вышесказанного в ходе верификационного эксперимента сроков годности термически обработанных готовых мясных продуктов (образцы 3–5), кроме микробиологических и органолептических показателей, контролировали характеристики окислительной порчи. Результаты определения кислотного числа в хранившихся в течение сроков годности образцов мясной продукции представлены на рисунок 4.

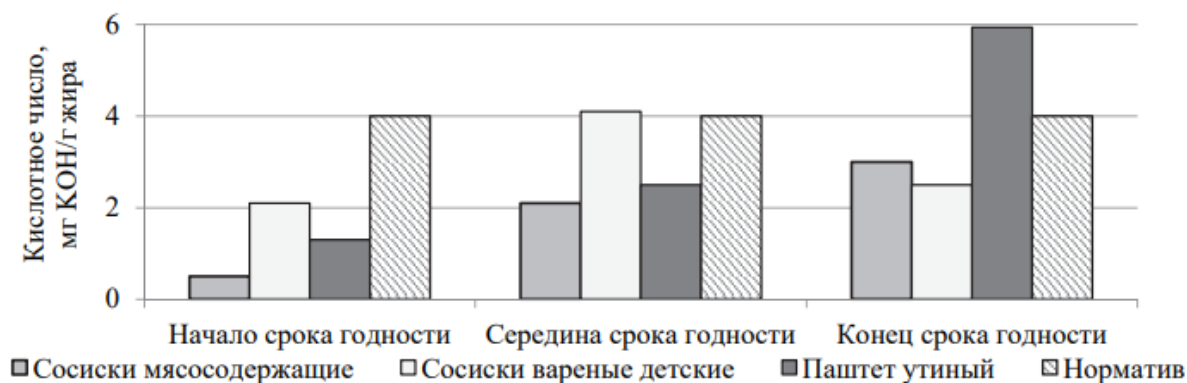


Рис. 4. Результаты определения кислотного числа в образцах мясной продукции

Как видно из представленных на рис. 4 данных, в начальный период хранения кислотное число в исследуемых образцах продукции составлял 0,5, 1,8 и 1,3 мг КОН/г жира для сосисок мясосодержащих, сосисок вареных детских и паштета утиного соответственно, что не превышал значения норматива для топленого жира (Колодязная, 2019: 10–138).

Данный критерий выбран для оценки результатов эксперимента, так как исследуемые образцы продукции в процессе технологического цикла проходили термическую обработку. К середине срока хранения образцов рассматриваемый показатель увеличился в 4 раза для сосисок мясосодержащих и в 2 раза для двух других образцов – сосисок вареных детских и паштета утиного (Коновалов, 2021: 10–105).

Результаты определения перекисного числа в хранившихся в течение срока годности исследуемых образцов термически обработанных продуктов представлены на рисунке 5.

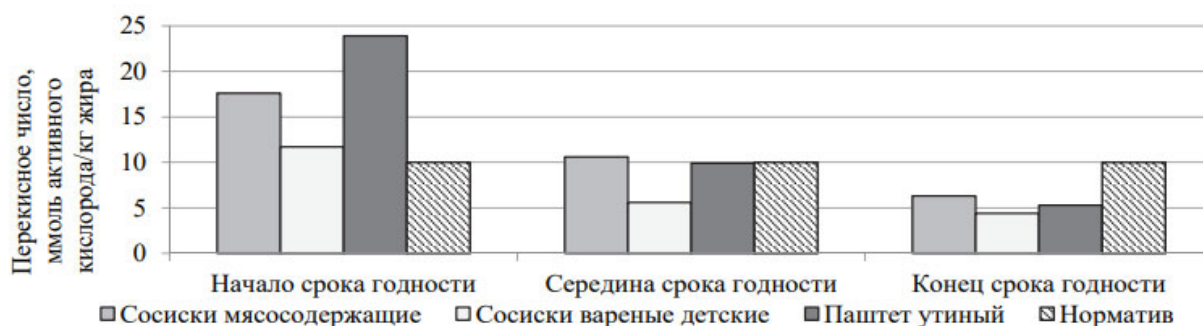


Рис. 5. Результаты определения перекисного числа в образцах мясной продукции

Данные рисунка 5 свидетельствуют о наличии противоположной динамики при изучении второго показателя окислительной порчи – перекисного числа в хранившихся образцах продукции.

Так, в начале срока годности во всех исследуемых образцах продукции перекисное число превышало значение 10 ммоль активного кислорода на 1 кг жира, выбранного в качестве норматива, а именно в 2,4, 1,7 и 1,2 раза для паштета утиного, сосисок мясосодержащих и сосисок вареных детских соответственно (Коновалов, 2021: 10–105).

Далее при хранении образцов продукции происходит существенное снижение уровня данного показателя на 40 и 35 % для сосисок мясосодержащих, на 48 и 33 % для сосисок вареных детских, на 60 и 47 % для паштета утиного в середине и конце срока годности соответственно.

Установленные в ходе лабораторного эксперимента высокие уровни перекисного числа для рассматриваемых образцов продукции могут указывать на наличие первичных продуктов окисления (перекисей и гидроперекисей), которые в последующий период хранения в результате окисления распадаются с образованием вторичных продуктов окисления – альдегидов, кетонов, эпоксидов, низших жирных кислот, что способствует увеличению значения кислотного числа (Коновалов, 2020: 15–155; Коновалов, 2015: 49–52).

Все вышеперечисленное свидетельствует о протекании сложных химических реакций (окисления, разложения) основных компонентов мясной продукции в период ее срока годности под воздействием рассмотренных выше физических факторов при ее транспортировании до объекта реализации. Это в свою очередь оказывает существенное влияние на интенсификацию процессов химической порчи продукции.

### **Заключение**

В ходе проведенного исследования была поставлена цель – изучить влияние условий хранения и транспортировки на микробиологическую и органолептическую стабильность мясной продукции, а также определить факторы, влияющие на ухудшение качества и срок годности готовых продуктов. Для достижения этой цели была разработана методология, включающая отбор и характеристику исследуемого материала, разработку стандартной и альтернативной программ контроля, а также использование микробиологических, химических и органолептических методов анализа.

Цели исследования были реализованы через последовательное выполнение следующих этапов: отбор образцов мясных продуктов, их хранение при контролируемых условиях, периодический отбор проб, проведение микробиологических и химических анализов, оценка органолептических свойств, а также статистическая обработка данных. Такой подход позволил установить достоверные закономерности изменения качества продукции в зависимости от времени хранения, условий транспортировки и специфики упаковки.

Результаты исследования показали, что наибольшее влияние на органолептическое и микробиологическое состояние продукции оказывают температура хранения и механические воздействия при транспортировке. Для охлажденных полуфабрикатов из мяса птицы были выявлены закономерности постепенного увеличения количества мезофильных микроорганизмов при превышении допустимой температуры хранения на 2–3 °С. Органолептические показатели, такие как запах, цвет и консистенция, также ухудшались с ростом температуры и длительности хранения. Для готовых мясных продуктов, включая сосиски и паштеты, наблюдалось преимущественно химическое ухудшение качества, проявляющееся в повышении кислотного и перекисного числа жира, что подтверждает гипотезу о комбинированном воздействии химических и микробиологических факторов на срок годности продукции.

Выводы исследования подтверждают истинность выдвинутой гипотезы: ухудшение качества мясной продукции является результатом совокупного воздействия микробиологических, химических и физических факторов, а интегрированное использование стандартных и альтернативных методов контроля позволяет более точно прогнозировать сроки годности продукции. Достоверность результатов обеспечена системностью подхода, использованием современных методов анализа и контролем экспериментальных условий, что повышает надежность полученных выводов и их практическую ценность.

Полученные результаты имеют значимые практические последствия. Во-первых, они могут быть использованы предприятиями мясной промышленности для оптимизации условий хранения и транспортировки, минимизации потерь продукции и повышения безопасности конечного продукта. Во-вторых, разработанные методы контроля и анализа

качества могут быть интегрированы в систему менеджмента безопасности пищевых продуктов, что позволит своевременно выявлять продукцию, не соответствующую установленным требованиям. В-третьих, результаты исследования открывают перспективу для дальнейших научных исследований, направленных на разработку новых упаковочных материалов, технологий охлаждения и методов микробиологического и химического мониторинга, способствующих увеличению сроков хранения и сохранению органолептических свойств продукции.

Таким образом, проведенное исследование позволило не только подтвердить первоначальные предположения о факторах порчи мясной продукции, но и расширить научное знание о взаимодействии микробиологических, химических и физических процессов в период хранения. Полученные результаты могут быть использованы для практической оптимизации условий транспортировки и хранения мясной продукции, повышения ее безопасности и качества, а также для разработки рекомендаций по стандартизации и контролю сроков годности. Перспективы дальнейшей работы включают: расширение спектра исследуемых продуктов, внедрение инновационных методов контроля качества, а также адаптацию результатов исследования к различным климатическим и логистическим условиям, что обеспечит более высокий уровень безопасности и потребительской ценности мясной продукции.

В целом, результаты исследования подтверждают важность комплексного подхода к изучению факторов, влияющих на качество и срок годности мясных продуктов, и демонстрируют возможности практического применения научных знаний в области пищевой промышленности. Научная новизна работы заключается в интегрированном использовании микробиологических, химических и органолептических методов контроля, а также в системной оценке влияния условий хранения и транспортировки на качество продукции, что открывает новые направления для исследований и внедрения эффективных технологий в производственную практику.

#### ЛИТЕРАТУРА

Абдуллаева, 2017 — Абдуллаева А.М., Серегин И.Г., Никитченко В.Е. Микробиологический мониторинг коммерческих полуфабрикатов из мяса птицы // Вестник РУДН. Сер. Агрономия и животноводство. 2017. — Т. 12. — № 4. — С. 350–358. [Russ.]

Полуфабрикаты натуральные из мяса птицы, 2011 — Полуфабрикаты натуральные из мяса птицы. Технические условия: ТУ ВУ 100098867.277-2011. — Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Бел. гос. ин-т стандартизации и сертификации. — 2011. — 25 с. [Russ.]

Показатели безопасности и безвредности для человека продовольственного сырья и пищевых продуктов, 2013 — Показатели безопасности и безвредности для человека продовольственного сырья и пищевых продуктов: гигиенический норматив. — Утв. постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 21.06.2013 № 52. — Минск: [Издательство/Минздрав]. — 2013. — 28 с. [Russ.]

Колодязная, 2019 — Колодязная В. С. Пищевая химия. — СПб.: СПбГАХПТ. — 2019. — 140 с. [Russ.]

Behdani, 2019 — Behdani B., Fan Y., Bloemhof-Ruwaard J. M. Cool chain and temperature-controlled transport: An overview of concepts, challenges, and technologies / Sustainable Food Supply Chains. — 2019. — P. 167–183. [Eng.]

Годовой отчет АО «Международный аэропорт Алматы», 2020 — Годовой отчет АО «Международный аэропорт Алматы» за 2020 год. — Алматы. — 2020. — 170 с. [Russ.]

Air Astana, 2022 — Integrated Report of Air Astana 2022. — 170 pages. [Eng.]

Коновалов, 2021 — Коновалов В.Л., Нутович В.Е., Пашков Н.Н., Ларино О.Н. и др. Современные транспортно-логистические технологии доставки грузов. — М.: ООО «Русайнс». — 2021. — 108 с. [Russ.]

Коновалов, 2020 — Коновалов В.Л., Лысенко Н.Е., Лахметкина Н.Ю., Щелкунова И.В. и др. Логистические технологии грузовых перевозок во крупных транспортных холдингах / — М.: ООО «Издательство «КноРус». — 2020. — 160 с. [Russ.]

Коновалов, 2015 — Коновалов В.Л., Айсина Л.Р., Багров А.С. Новые технологии, повышающие сохранность перевозимых грузов // Материалы IV Всероссийской научно-практической конференции «История и перспективы развития транспорта на севере России». — 2015. — № 1. — С. 49–52. [Russ.]

#### REFERENCES

Abdullaeva, 2017 — Abdullaeva, A.M., Seregin, I.G., Nikitchenko, V.E. (2017). Mikrobiologicheskii monitoring kommercheskikh polufabrikatov iz myasa ptitsy [Microbiological monitoring of commercial poultry meat semi-finished products]. — Vestnik RUDN. Ser. Agronomiya i zhivotnovodstvo. — 2017. — Vol. 12, No. 4. — P. 350–358. [in Russ.]

Polufabrikaty natural'nye iz myasa ptitsy, 2011 — Polufabrikaty natural'nye iz myasa ptitsy. (2011). Tekhnicheskie usloviya: TU BY 100098867.277-2011 [Natural poultry meat semi-finished products. Technical conditions]. — Minsk: Mezhgos. Sovet po standartizatsii, metrologii i sertifikatsii. Bel. gos. in-t standartizatsii i sertifikatsii. — 2011. — 25 p. [in Russ.]

Pokazateli bezopasnosti i bezvrednosti dlya cheloveka prodovol'stvennogo syr'ya i pishchevykh produktov, 2013 — Pokazateli bezopasnosti i bezvrednosti dlya cheloveka prodovol'stvennogo syr'ya i pishchevykh produktov (2017): gigenicheskiy normativ [Indicators of safety and harmlessness for human food raw materials and food products: hygienic standard]. — Utv. postanovleniem Ministerstva zdravookhraneniya Respubliki Belarus' ot 21.06.2013 № 52. — Minsk: [Izdatel'stvo/Minzdrav]. — 2013. — 28 p. [in Russ.]

Kolodiaznaia, 2019 — Kolodiaznaia, V.S. (2019). Pishchevaia khimiia [Food chemistry]. — SPb.: SPbGAKhPT. — 2019. — 140 p. [in Russ.]

Behdani, 2019 — Behdani, B., Fan, Y., Bloemhof-Ruwaard, J.M. (2019). Cool chain and temperature-controlled transport: An overview of concepts, challenges, and technologies. — Sustainable Food Supply Chains. — 2019. — P. 167–183. [in Eng.]

Godovoi otchet AO «Mezhdunarodnyi aeroport Almaty», 2020 — Godovoi otchet AO «Mezhdunarodnyi aeroport Almaty» za 2020 god [Annual report of Almaty International Airport for 2020]. — Almaty. — 2020. — 170 p. [in Russ.]

Air Astana, 2022 — Integrated Report of Air Astana 2022. — 170 p. [in Eng.]

Konovalov, 2021 — Konovalov, V.L., Nutovich, V.E., Pashkov, N.N., Larino, O.N. et al. (2021). Sovremennye transportno-logisticheskie tekhnologii dostavki gruzov [Modern transport and logistics technologies of cargo delivery]. — M.: OOO «Rusains». — 2021. — 108 p. [in Russ.]

Konovalov, 2020 — Konovalov, V.L., Lysenko, N.E., Lakhmetkina, N.Yu., Shchelkunova, I.V. et al. (2020). Logisticheskie tekhnologii gruzovykh perevozok vo krupnykh transportnykh holdingakh [Logistics technologies of cargo transportation in large transport holdings]. — M.: OOO «Izdatel'stvo Knorus». — 2020. — 160 p. [in Russ.]

Konovalov, 2015 — Konovalov, V.L., Aisina, L.R., Bagrov, A.S. (2015). Novye tekhnologii, povyshaiushchie sokhrannost' perevozimykh gruzov [New technologies improving the preservation of transported cargo]. — Materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Istoriia i perspektivy razvitiia transporta na severe Rossii». — 2015. — No. 1. — P. 49–52. [in Russ.]

Industrial Transport of Kazakhstan  
ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 21. Is. 4. Number 84 (2024). Pp. 70–88  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.006>

## OPTIMIZATION OF LOGISTICS COSTS IN THE RAILWAY FREIGHT TRANSPORTATION SYSTEM

*N.V. Devet'yarova*

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.  
[devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz](mailto:devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz)

**Nadezhda Devet'yarova** — Senior Lecturer, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.  
E-mail: [devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz](mailto:devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0001-6729-2111>.

© N.V. Devet'yarova

**Abstract.** In the context of economic globalization, increasing complexity of supply chains, and rising requirements for transport system efficiency, the problem of managing logistics costs in railway transportation becomes particularly relevant. Railway transport plays a key role in the transport system of the Republic of Kazakhstan, ensuring a significant share of freight turnover and forming the basis of the country's transit potential. Therefore, the study of logistics cost formation and optimization methods is an important scientific and practical task. The purpose of this study is to provide a theoretical justification and develop practical recommendations for optimizing logistics costs in railway transportation based on the total cost concept. To achieve this purpose, the study addresses the following objectives: to define the economic essence of logistics costs; to analyze the structure and dynamics of railway logistics expenses; to identify key factors affecting cost levels; and to substantiate directions for cost reduction using a logistics and systems approach. The results of the study show that traditional cost management methods focused mainly on transportation expenses do not fully reveal efficiency improvement reserves. It is proven that the application of the total logistics cost concept allows reducing transportation costs through optimization of procurement activities, inventory management, and rationalization of transport processes. Practical recommendations are proposed to improve accounting and analysis of logistics costs and to implement logistics controlling. In conclusion, the study confirms the feasibility of introducing integrated logistics management in railway companies. The obtained results can be used in managerial decision-making aimed at increasing economic efficiency and competitiveness of railway transport.

**Keywords:** logistics, logistics costs, railway transportation, supply chain, cost management, transport system

**For citation:** N.V. Devet'yarova. Optimization of Logistics Costs in the Railway Freight Transportation System//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 84. Pp. 70–88. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.006>.

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

## ТЕМІРЖОЛ КӨЛІГІ ЖҮЙЕСІНДЕ ЛОГИСТИКАЛЫҚ ШЫҒЫНДАРДЫ ОҢТАЙЛАНДЫРУ

*Н.В. Деветьярова*

Халықаралық көлік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.  
[devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz](mailto:devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz)

**Деветьярова Надежда** — аға оқытушысы, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университет, Алматы, Қазақстан.

E-mail: devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0001-6729-2111>.

© Н.В. Деветьярова

**Аннотация.** Экономиканың жаһандануы, жеткізу тізбектерінің күрделенуі және көлік жүйелерінің тиімділігіне қойылатын талаптардың артуы жағдайында теміржол көлігіндегі логистикалық шығындарды басқару мәселесі ерекше өзектілікке ие болып отыр. Теміржол тасымалдары Қазақстан Республикасының көлік жүйесінде маңызды орын алады және елдің транзиттік әлеуетін қалыптастыруда шешуші рөл атқарады. Осыған байланысты логистикалық шығындардың қалыптасу ерекшеліктерін зерттеу және оларды оңтайландыру жолдарын анықтау маңызды ғылыми-тәжірибелік міндет болып табылады. Зерттеудің мақсаты – жиынтық шығындар тұжырымдамасына негізделі отырып, теміржол тасымалдары жүйесіндегі логистикалық шығындарды оңтайландырудың теориялық негіздерін айқындау және практикалық ұсыныстар әзірлеу. Аталған мақсатқа жету үшін логистикалық шығындардың экономикалық мәні ашылды, теміржол тасымалдарындағы шығындардың құрылымы мен динамикасы талданды, олардың деңгейіне әсер ететін негізгі факторлар анықталды және шығындарды төмендетудің бағыттары негізделді. Зерттеу нәтижесінде шығындарды басқарудың дәстүрлі тәсілдері барлық мүмкін резервтерді толық ашпайтыны анықталды. Логистикалық шығындарды жеткізу тізбегінің барлық кезеңдері бойынша қарастыру тасымалдардың өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік беретіні дәлелденді. Логистикалық шығындарды есепке алу мен талдауды жетілдіру бойынша практикалық ұсыныстар берілді. Қорытындылай келе, теміржол кәсіпорындарының қызметіне кешенді логистикалық басқаруды енгізу экономикалық тиімділікті арттырудың маңызды шарты болып табылады. Зерттеу нәтижелері басқарушылық шешімдер қабылдау барысында пайдаланылуы мүмкін.

**Түйін сөздер:** логистика, логистикалық шығындар, теміржол тасымалдары, жеткізу тізбегі, шығындарды басқару, көлік жүйесі

**Дәйексөздер үшін:** Н.В. Деветьярова. Теміржол көлігі жүйесінде логистикалық шығындарды оңтайландыру//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 84. 70–88 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.006>.

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

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ИЗДЕРЖЕК В СИСТЕМЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПЕРЕВОЗОК

*Н.В. Деветьярова*

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.  
[devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz](mailto:devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz)

**Деветьярова Надежда** — старший преподаватель, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: [devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz](mailto:devetyarova.nadezhda@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0001-6729-2111>.

© Н.В. Деветьярова

**Аннотация.** В условиях глобализации экономики, усложнения цепей поставок и роста требований к эффективности транспортных систем особую актуальность приобретает проблема управления логистическими издержками на железнодорожном транспорте.



Железнодорожные перевозки занимают ключевое место в транспортной системе Республики Казахстан, обеспечивая значительную долю грузооборота и формируя основу транзитного потенциала страны. В этой связи исследование факторов формирования логистических издержек и поиск путей их оптимизации являются важной научно-практической задачей. Целью исследования является теоретическое обоснование и разработка практических рекомендаций по оптимизации логистических издержек в системе железнодорожных перевозок на основе концепции совокупных затрат. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи: раскрыта экономическая сущность логистических издержек и их роль в транспортно-логистических системах; проанализирована структура и динамика логистических затрат железнодорожных перевозок; выявлены ключевые факторы, влияющие на уровень издержек; обоснованы направления их снижения с использованием логистического и системного подходов. В результате исследования установлено, что традиционные методы управления затратами, ориентированные преимущественно на учет перевозочных расходов, не обеспечивают полного выявления резервов повышения эффективности. Доказано, что применение концепции совокупных логистических издержек позволяет снизить себестоимость перевозок за счет оптимизации закупочной деятельности, управления запасами и рационализации транспортных процессов. Предложены практические рекомендации по совершенствованию учета и анализа логистических затрат, а также по внедрению логистического контроллинга. В заключении сделан вывод о целесообразности внедрения комплексного логистического управления в деятельности железнодорожных компаний. Полученные результаты могут быть использованы при разработке управленческих решений, направленных на повышение экономической эффективности и конкурентоспособности железнодорожного транспорта.

**Ключевые слова:** логистика, логистические издержки, железнодорожные перевозки, цепи поставок, управление затратами, транспортная система

**Для цитирования:** Н.В. Деветьярова. Оптимизация логистических издержек в системе железнодорожных перевозок//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 84. Стр. 70–88. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.006>.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Введение

Железнодорожный транспорт традиционно занимает ключевое место в транспортной системе Республики Казахстан, обеспечивая основной объем грузовых перевозок и формируя устойчивые логистические связи между регионами страны, а также с внешними рынками. В условиях роста грузооборота, усиления международной конкуренции и повышения требований к качеству транспортно-логистических услуг особую значимость приобретает проблема оптимизации логистических издержек в системе железнодорожных перевозок. Выбор данной темы обусловлен необходимостью поиска эффективных инструментов управления затратами в условиях ограниченных инвестиционных ресурсов, высокого износа инфраструктуры и подвижного состава, а также усложнения цепей поставок (Перешина, 2021: 115–217).

Опыт предшествующих исследований показывает, что вопросы себестоимости железнодорожных перевозок, структуры транспортных расходов и тарифообразования достаточно широко освещены в научной литературе (Смехова и др., 2023: 75–116; Дроздов, 2019: 344–358). Вместе с тем, несмотря на значительный объем теоретических разработок, сохраняется проблемная ситуация, связанная с недостаточной интеграцией логистического подхода в систему управления затратами железнодорожных компаний. В частности, остаются недостаточно проработанными вопросы учета и анализа совокупных логистических издержек по всей цепи товародвижения, включая закупочную логистику,

складирование и реверсивные потоки, а также их влияние на финансовые результаты деятельности перевозчика.

Актуальность темы исследования определяется тем, что в современных условиях хозяйствования оптимизация логистических издержек становится одним из ключевых факторов повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта и устойчивости транспортно-логистических систем. Рост тарифного давления, увеличение доли мелкопартионных отправок, развитие контейнерных перевозок и цифровизация логистических процессов требуют пересмотра традиционных подходов к управлению затратами и внедрения комплексных моделей минимизации совокупных издержек (Карсыбаев, Карибжанов, 2020: 64–68). При этом практическая значимость темы заключается в возможности использования результатов исследования для совершенствования системы бюджетирования, планирования и контроля логистических затрат в железнодорожных компаниях.

Объектом исследования является система железнодорожных перевозок как элемент транспортно-логистической системы.

Предметом исследования выступают логистические издержки, формирующиеся в процессе организации и осуществления железнодорожных перевозок грузов, а также механизмы их оптимизации.

Цель исследования заключается в обосновании теоретических и практических подходов к оптимизации логистических издержек в системе железнодорожных перевозок на основе концепции совокупных затрат и логистического управления цепями поставок.

Для достижения поставленной цели в работе предполагается решение следующих задач:

- исследовать сущность и структуру логистических издержек в системе железнодорожных перевозок;
- проанализировать особенности формирования совокупных затрат на различных стадиях товародвижения;
- оценить влияние переменных и условно-постоянных расходов на себестоимость транспортных услуг;
- обосновать направления оптимизации логистических затрат с учетом интеграции транспортных и закупочных функций;
- разработать предложения по совершенствованию учета и анализа логистических издержек в железнодорожных компаниях.

В ходе исследования используются методы системного и структурно-функционального анализа, экономико-статистические методы, методы сравнительного анализа, логистическое моделирование и методы оптимизации.

Методологической основой исследования послужили логистический, процессный и системный подходы, позволяющие рассматривать железнодорожные перевозки как совокупность взаимосвязанных потоков материальных, финансовых и информационных ресурсов.

Гипотеза исследования состоит в предположении, что внедрение комплексного логистического управления, ориентированного на минимизацию совокупных затрат по всей цепи товародвижения, позволит существенно снизить издержки железнодорожных перевозок без ухудшения качества транспортного обслуживания.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии положений логистической теории применительно к управлению затратами на железнодорожном транспорте. Практическая значимость состоит в возможности использования полученных выводов и рекомендаций в деятельности железнодорожных компаний при планировании, учете и контроле логистических издержек, а также при формировании тарифной и инвестиционной политики.

### **Материалы и методы**

Методология исследования направлена на комплексное изучение проблемы оптимизации логистических издержек в системе железнодорожных перевозок и основана на сочетании теоретических и прикладных методов анализа. В работе использован системный подход, позволяющий рассматривать железнодорожные перевозки как элемент интегрированной транспортно-логистической системы, в рамках которой формируются и взаимодействуют материальные, финансовые и информационные потоки (Перешина, 2021: 115–217).

В ходе исследования были поставлены следующие ключевые вопросы:

- каким образом формируются логистические издержки в системе железнодорожных перевозок;
- какова структура совокупных затрат на различных стадиях товародвижения;
- какие факторы оказывают наибольшее влияние на уровень логистических издержек;
- какие методы и инструменты логистического управления позволяют минимизировать совокупные затраты без снижения качества транспортных услуг.

Исследование базируется на гипотезе о том, что внедрение комплексного логистического управления, ориентированного на минимизацию совокупных затрат по всей цепи поставок, включая закупочную логистику, складирование и транспортировку, позволяет снизить логистические издержки железнодорожных перевозок и повысить эффективность функционирования транспортно-логистической системы в целом (Дроздов, 2019: 344–358).

Материалами исследования послужили:

- статистические и аналитические данные деятельности железнодорожного транспорта Республики Казахстан за 2021–2023 гг.;
- показатели объемов перевозок, грузооборота, структуры доходов и затрат железнодорожной компании;
- данные бухгалтерской и управленческой отчетности по логистическим и производственным затратам;
- материалы нормативно-методического характера, регламентирующие учет затрат и тарифообразование;
- научные публикации отечественных и зарубежных авторов по проблемам логистики, экономики транспорта и управления цепями поставок (Смехова и др., 2023: 75–116; Карсыбаев и др., 2020: 64–68).

Количественная характеристика материала представлена показателями грузооборота, объемов перевозок, доходов и затрат, включая логистические издержки, выраженные в стоимостном и удельном измерении. Качественная характеристика материала включает анализ структуры затрат, причин образования сверхнормативных запасов материально-технических ценностей, а также особенностей организации закупочной и транспортной логистики в филиалах железнодорожной компании. Достаточность и репрезентативность используемых данных обеспечивают достоверность полученных выводов.

Исследование проводилось в несколько последовательных этапов:

Аналитический этап, включающий изучение научных публикаций и нормативных документов по проблеме логистических издержек и управления затратами на железнодорожном транспорте.

Диагностический этап, на котором осуществлялся анализ структуры и динамики логистических и производственных затрат, а также выявление факторов, влияющих на их изменение.

Моделирующий этап, предусматривающий применение концепции совокупных затрат и расчет экономических показателей эффективности логистических решений.

Обобщающий этап, направленный на формулирование выводов и разработку практических рекомендаций по оптимизации логистических издержек.

В работе использованы следующие методы исследования:

- системный и структурно-функциональный анализ — для изучения взаимосвязей между элементами транспортно-логистической системы;
- экономико-статистические методы — для анализа динамики и структуры затрат, доходов и объемов перевозок;
- метод сравнительного анализа — для сопоставления плановых и фактических показателей, а также данных по различным периодам;
- логистическое моделирование — для оценки влияния размера партий поставок и структуры товародвижения на совокупные затраты;
- методы оптимизации — для определения направлений минимизации логистических издержек при заданном уровне транспортного обслуживания.

Научная новизна методологического подхода заключается в комплексном использовании концепции совокупных затрат применительно к железнодорожным перевозкам с акцентом на закупочную логистику и управление материальными запасами. В отличие от традиционных исследований, ориентированных преимущественно на анализ перевозочных расходов, в данной работе логистические издержки рассматриваются по всей цепи товародвижения, что позволяет выявить дополнительные резервы их оптимизации и обосновать практические рекомендации для железнодорожных компаний.

#### **Результаты и обсуждение**

Концепция “совокупных затрат” в логистической деятельности на транспорте рассматривает необходимые затраты по перемещению грузов и грузомест как единое целое, с признанием существования взаимосвязи между ними, оптимального сочетания отдельных операций для достижения стратегической цели. В концепции “совокупных затрат” все статьи затрат рассматриваются одновременно для обеспечения требуемого уровня логистического обслуживания. При этом оптимизация “совокупных затрат” достигается методом снижения одних видов затрат и повышения других видов, когда третьи виды затрат могут оставаться неизменными по принципу компромисса.

Создание механизма управления расходами предполагает прежде всего методическую проработку и согласование отдельных его звеньев. Так, методики планирования и учета расходов должны обеспечить формирование необходимой информации для анализа причин отклонений их фактических величин от предусмотренных соответствующими бюджетами или сложившихся в предотчетных периодах. При разработке бюджетов затрат следует предусмотреть мобилизацию выявленных при анализе резервов улучшения работы. Экономическое стимулирование работников необходимо организовывать исходя из выявленного в процессе анализа вклада трудовых коллективов в итоги хозяйственной деятельности. Результаты сравнительного анализа хозяйствования однотипных подразделений могут быть основой для принятия решений о распространении передового опыта организации производства и т.п.

Основными задачами анализа расходов являются:

- оценка причин изменений их абсолютных величин и удельных затрат (себестоимости продукции, работ, услуг) в сравнении с планом (бюджетом), предотчетным периодом, данными однотипных подразделений;
- выявление влияния на расходы и себестоимость продукции, работ или услуг усилий коллектива и внешних факторов, отражающих условия работы;

-подсчет упущенных возможностей снижения себестоимости работ и ожидаемого роста эффективности производства за счет лучшего использования основных средств, трудовых, материальных и энергетических ресурсов.



В процессе доаналитической обработки исходной информации расходы подвергаются дополнительной группировке в соответствии со схемой рисунка 1.

Рис. 1. Группировка расходов на железнодорожные перевозки

При анализе себестоимости перевозок и соответствующих расходов используют информацию об отчетных и плановых (базисных) расходах на перевозки, о степени выполнения плана (о темпах роста) грузооборота, пассажирооборота и показателей работы подвижного состава, данные калькуляций расходов по видам перевозок. Для анализа привлекаются результаты плановых расчетов показателей объемов перевозок и бюджетов расходов, сведения регистров бухгалтерского учета, отчетов по основным показателям производственно-финансовой деятельности организаций железнодорожного транспорта. Их большая часть связана с предоставлением услуг локомотивной тяги и ремонтом подвижного состава. В пассажирском движении эти расходы составили около 84 %, в грузовом — примерно 73 % общей суммы переменных расходов. Отметим, что структура исследуемых расходов по видам деятельности в отчетном периоде изменилась незначительно, что объясняется стабильностью системы управления производством и применяемых технологических процессов.

В основе методики анализа расходов на производство любой продукции, работ или услуг лежит их деление по признаку зависимости от объемов производства. Считается, что изменение объемов производства вызывает соответствующее изменение зависящих (переменных) расходов, сказывается и на уровне себестоимости продукции: с увеличением

объема производства снижается себестоимость продукции, исчисленная в части условно-постоянных расходов, и наоборот.

Очевидно, что результаты оценки влияния данного и других факторов будут определяться обоснованностью разграничения расходов на зависящие и не зависящие от объемов производства. В частности, расходы на организацию логистики закупок и движения материальных ресурсов следует отнести, частично *к условно-постоянным расходам и к переменным расходам*. Обычно тарифы рассчитываются, как произведение средней тарифной ставки на 1т. (или другую единицу измерения) груза данного класса (при установленном среднем расстоянии) на его массу.

На железнодорожном транспорте сложились два подхода к определению величины условно-постоянных и переменных расходов. Один из них — постатейное и поэлементное изучение порядка формирования расходов и их зависимости от объемов производства. Он позволяет наиболее точно разграничить расходы по данному признаку. Другой подход состоит в построении экономико-математических моделей зависимости расходов по отдельным статьям и элементам затрат от объемов производства.

Для слаженного корпоративного менеджмента в структурных подразделениях железнодорожной компании, которые фактически являются центрами расходов, единая методология анализа и прогнозирования совокупных затрат должна быть раскрыта в методических рекомендациях по анализу влияющих на расходы факторов, определения сумм переменных расходов в разрезе статей затрат для внутригодового, годового и долгосрочного периодов. При изменении экономических и эксплуатационных условий работы филиалов (железных дорог) эти рекомендации корректируются, поскольку рост или снижение объемов перевозок, совершенствование технологии и системы управления производством, изменения в методике учета затрат и системы налогообложения приводят к существенным изменениям состава условно-постоянных и переменных расходов.

При анализе расходов железной дороги за год и внутри года к переменным относят главным образом расходы, непосредственно связанные с работой подвижного состава. Однако, если за изучаемый период сложились высокие темпы прироста объема перевозок, то к переменным расходам нужно добавить часть расходов на текущее содержание пути, техническое обслуживание и текущий ремонт контактной сети.

Все расходы, не отнесенные к переменным, считают условно- постоянными, т.е. не зависящими от объемов выполняемых работ. В их составе значительный удельный вес занимают расходы хозяйства пути, гражданских сооружений, сигнализации и связи, электрификации и энергетики, а также расходы собственно управления дороги.

Транспортно-логистическая система не может быть эффективной, если она не контролирует свои транспортно-логистические затраты. Тариф услуг должен обеспечивать покрытие всех связанных с оказанием транспортно-логистических услуг затрат во всей цепи поставок грузов, в том числе и в региональном разрезе. Используя возможности реверсивной логистики, т. е. понятия, охватывающего логистический менеджмент и функционирование транспортно-логистической системы по снижению и устранению опасных и неопасных потерь, возможно обратное распределение потоков, т.е. движение товаров и информации в направлении, противоположном тому, в котором протекает нормальная транспортно-логистическая деятельность.

Экономия совокупных затрат в закупочной логистике при интеграции транспортных функций будет наибольшей в звене контейнеризации перевозок. При этом согласно теории компромиссов в логистике, интеграция всех сервисных, включая закупочные, потоков в увязке с параметрами, потоков основного производства направлена на оптимизацию затрат в рамках всей логистической системы (Перешина, 2021: 115–217).

Выделяются два концептуальных подхода:

- подход, где областью действия являются затраты на отдельные логистические операции системы;

- подход, основанный на минимизации затрат компании, где критерием его является максимальный доход (*ЧД*), в том числе извлекаемый из логистических операций при удовлетворении спроса потребителей.

Формула 9 помогает рассчитать максимальный доход:

$$ЧД = Др - (Мз + Мп) - Злог - Зпроч \rightarrow \max \quad (1),$$

где *Др* – доход от реализации транспортных услуг;

*Мз* – стоимость закупленных материальных ресурсов для производства транспортных услуг;

*Мп* – производственные затраты, относимые на производство транспортных услуг;

*Злог* – логистические издержки на выполнение транспортных услуг;

*Зпроч* – прочие затраты железнодорожной компании.

Осуществление логистической политики закупок любой компании связано с расходами на формирование сети логистических цепей, выбор и оценку поставщиков, объявление конкурса на осуществление поставок, транспортно-экспедиционные издержки, почтово-телеграфные, командировочные, представительские и прочие расходы (охрана, выполнение дополнительных требований потребителей и др.) (Смехова, 2023: 75–116).

Затраты по завозу материальных ресурсов (расходы по оплате тарифов и сборов транспортных организаций по продвижению материальных потоков, расходы на содержание собственного транспорта и организацию процесса транспортировки на собственные склады) являются частью транспортно-экспедиционных издержек. Сборы транспортных организаций осуществляются за выполнение погрузочно-разгрузочных работ, подачу и уборку вагонов, транспортно-экспедиционное обслуживание и другие услуги.

Таким образом, логистическое управление цепью поставок должно быть направлено на выявление направлений минимизации совокупных затрат и максимальное удовлетворение потребностей покупателей, главным образом за счет материального и финансового ресурсосбережения.

Чтобы определить уровень их эффективности, необходимо совокупные затраты на перемещение продукции отнести к объему продукции (выраженному в натуральных измерителях) в ассортименте, необходимом потребителю. В системе логистического управления товародвижением эффективность достижения целей должна измеряться связанными с этим процессом затратами, которые и отражают качественные результаты функционирования системы. Структура затрат компании, включая затраты на закупочную логистику представлены в таблице 1.

Таблица 1- Структура затрат компании, включая затраты на закупочную логистику

Показатели	Ед. измерения	2021	2023	Откл (+,-)
Перевезено грузов	тыс. тонн	551316	646632	+95316
Грузооборот тарифный	млн ткм	406959	490260	+ 83301
Доход от перевозок (услуги) – ( <i>Др</i> )	млн.тг.	1298142	1875942	+192600
Стоимость закупленных материальных ресурсов - ( <i>Мз</i> )	млн.тг.	52380	78300	-8640
Производственные затраты, отнесенные на производство транспортных услуг - ( <i>Мп</i> )	млн.тг.	599508	681750	+ 27414
Логистические издержки на выполнение транспортных услуг - ( <i>Злог</i> )	млн.тг.	15723	30537	+4941
Прочие затраты – ( <i>Зпроч</i> )	млн.тг.	8883	14040	+1629
Доход перед выплатой подоходного налога ( <i>ЧД</i> )	млн.тг.	621648	1071315	+149889
Удельные затраты на логистические операции	тыс.тг.	3861	4788	+ 309

По данным таблицы 1 доход от грузоперевозок вырос на 72,3 %. В данном примере удельные затраты на закупку материальных ресурсов (не считая основных фондов) увеличились на 24 % (в 2021 г. - 3861 тыс. тенге на 1 ткм грузооборота и 4788 тыс. тенге на единицу грузооборота в 2023 г.). Логистические издержки (перевозка контейнеров, военизированная охрана перевозимых грузов, погрузочно-разгрузочные работы и др.) увеличились почти вдвое (+ 94,2 %). По экспертным расчетам, затраты на логистические услуги по закупкам в 2025 году по КТЖ составили 39,9 % в общем объеме закупок работ и услуг (без закупок товаров) и 34,1 % в объеме закупок товаров.

Множественность элементов совокупных затрат на перемещение продукции зависит от поэтапности процесса перемещения продукции или товародвижения. Издержки товаропотока формируются как в коммерческо-посреднических организациях, на транспорте, так и в обслуживаемых ими отраслях, т.е. у поставщиков и потребителей. Затраты на товародвижение связаны с формированием запасов продукции на складах поставщика перед ее отправкой, загрузкой транспортных средств, непосредственно с перевозкой грузов, с формированием запасов продукции на складах посредника, выгрузкой продукции, хранением ее на складах потребителя.

Использование новых инструментов транспортно-логистического управления основано на внедрении новых технологий в информационно- телекоммуникационное обеспечение и компьютерной технологии обработки данных, что позволяет определять необходимые объемы товарных закупок, управлять логистической цепью поставок грузов, предотвращать накопление сверхнормативных запасов филиалами компании, которые увеличивают транспортно-логистические затраты. Состояние материальных запасов ТМЦ в филиалах АО «НК «КТЖ» представлены в таблице 2.

Главное направление затрат заготовительной логистики состоит не только в бездефицитном и ритмичном удовлетворении потребности в материальных ресурсах компании, но и в поддержании нормативного уровня запасов для каждой номенклатурной позиции. Наличие сверхнормативных материальных запасов свидетельствует о перерасходе условно-постоянных расходов на их складирование и содержание, т.е. о недостаточно четкой логистике закупок и складирования филиалами компании.

В связи с этим целесообразно установить порядок, при котором потребителям компенсировались бы дополнительные расходы, связанные с накоплением запасов и хранением продукции, в случае превышения нормативов единовременной поставки. В результате значительно повысится ответственность за ритмичный сбыт продукции, за выполнение закупочно-торговыми организациями и службами сбыта оперативных планов поставок продукции. Основным методологическим вопросом развития логистического управления является определение показателей его эффективности. Казахстанские ученые Е.Д. Атамкулов, К.К. Жангаскин, Р.К. Сатова детально исследовали порядок формирования показателей эффективности логистических затрат на железнодорожном транспорте (Дроздов, 2019: 344–358).

Таблица 2- Состояние материальных запасов ТМЦ в филиалах АО «НК «КТЖ»

Балансовый счет	1,5 месячный запас, тыс.тг.	Сверхнор- мативный запас, тыс.тг.	Превышение норматива, % 4/3	Причина образования сверхнормативных запасов
Счет 201- Прокат черных металлов	118917	280401	233,3%	Нарушение условий поставки. Поступление катанки в российских вагонах. Во избежание простоя вагона катанка выгружена на станции до реализации предприятиям для строительных работ
Счет 203 – Топливо	29352	12810	43,6%	Нарушение ритмичности поставки. Поставка годового объема топлива за 2024 г. в III кв. 2024 г.

Счет 206 –Металлолом, постельные принадлежности, спецодежда	384561	150231	39,1 %	Нарушение ритмичности поставки. Централизованное поступление за 2024 г. спецодежды, противогазов, бланков
Счет 208-Строительные материалы	47568	13803	29%	Нарушение ритмичности поставки. Централизованная поставка с материальной базы стройматериалов для текущего ремонта хозспособом за 2023-2024 гг.

По их мнению, при определении эффективности управления товародвижением следует учитывать то, что в современных условиях хозяйствования первостепенное значение приобретают такие показатели, как объемы перевозок конкретных грузов, а не общие объемы перевозок, конечные затраты на весь процесс доставки продукции потребителю, а не только на перевозку. Должна быть повышена роль показателей, характеризующих не столько объемы деятельности транспортных и оптово-торговых предприятий и организаций, сколько затраты на конечные результаты этой деятельности, необходимой для смежных отраслей и обслуживаемых предприятий.

Следовательно, назрела необходимость внедрения соответствующей отчетности в филиалах компании с выделением логистических затрат в структуре себестоимости отдельной строкой, в том числе затрат на организацию закупочной деятельности. Значимость информации затрат по состоянию закупок компании в логистическом процессе движения материальных потоков представляется весьма важной. Мониторинг учета данных затрат ускорит работу по экономии логистических затрат на создание запасов. Предлагаемая форма отчетности по логистическим затратам на закупки компании представлена в таблице 3. В номенклатуре расходов основной деятельности железнодорожной компании, таким образом, должны быть выделена статья учета логистических затрат на закупки.

Таблица 3 – Предлагаемая форма отчетности по логистическим затратам на закупки компании

Основание записи (документов) счета и субсчета	Все виды логистических затрат, тенге							Итого затрат
	Расходы на проведение способов закупок	Наценки, уплаченные снабженческо-сбытовым организациям	Провозная плата с дополнительными сборами	Расходы на разгрузку и доставку закупок	Расходы на охрану перевозимых грузов	Расходы на содержание агентов в местах заготовок	Прочие расходы, недостача, потери	
По счету 201 «Прокат черных металлов» Субсчет 01 «Сталь и проволока»								
Субсчет 02 «Кабельная продукция»								
По счету 203 «Топливо» Субсчет 01 «Нефтепродукты»								
Субсчет 02 «Смазочные материалы»								
Субсчет 03 «Твердое топливо»								

Для обоснования элементов затрат, характеризующих эффективность управления товародвижением, российскими учеными был проведен комплексный расчет на примере

массовых видов продукции: проката черных металлов, каменного угля, дизельного топлива, мазута, деловой древесины, пиломатериалов, цемента, мягкой кровли, кальцинированной и каустической соды.

По результатам расчета получена структура затрат по месту их формирования, стадиям перемещения продукции и т.д. По месту своего формирования затраты включают в себя расходы поставщиков, потребителей, коммерческо-посреднических и транспортных организаций. Причем удельный вес расходов у потребителей колеблется от 17,3 % (по деловой древесине) до 63 % (по мягкой кровле), в среднем 24,3 %; удельный вес расходов, возникающих у поставщиков, составляет от 4,1 % (по черным металлам) до 37 % (по деловой древесине), в среднем 18,5 %; удельный вес расходов коммерческо-посреднических организаций равен в среднем 3,2 %, а по отдельным видам продукции (черным металлам, дизельному топливу) достигает 12 — 17 %; затраты на транспорте составляют в среднем 54 % (включая затраты в запасы продукции в пути) в общем объеме затрат на перемещение продукции, по отдельным ее видам — от 22,7 % (по мягкой кровле) до 64,5 % (по пиломатериалам) (Смехова, 2023: 75–116).

По стадиям перемещения продукции затраты могут быть объединены в две группы: затраты на перевозку (включая затраты на загрузку и разгрузку транспортных средств) и складирование. Первая группа затрат составляет в среднем 62,5 % в общей сумме затрат, а по отдельным видам продукции — от 29,3 % (по мягкой кровле) до 73,4 % (по цементу), вторая группа — в среднем 37,5 %, а по отдельным видам продукции — от 27 % (по цементу) до 70,7 % (по мягкой кровле).

По периоду окупаемости должны быть выделены текущие и единовременные затраты на перемещение продукции. Первая группа затрат на железных дорогах занимает в среднем 86,1 %, ее удельный вес колеблется от 53,5 % (по мягкой кровле) до 92,6 % (по цементу), вторая группа затрат — 13,9 % и по отдельным видам продукции — от 7,4 % (по цементу) до 46,5 % (по мягкой кровле). По операциям перемещения первая группа затрат, связанных непосредственно с перевозкой (включая затраты на запасы продукции в пути), составляет в среднем 54 % (от 22,7 % по мягкой кровле до 64,5 % по пиломатериалам), вторая группа затрат на грузовые операции — 8,5 % (от 4,4 % по деловой древесине до 17,1 % по цементу) и третья группа затрат на складирование — 37,5 % (Прокофьева, 2018: 2–14).

Следовательно, критериями управления товародвижением являются минимизируемые совокупные затраты на перемещение единицы продукции в соответствии с заключенными договорами поставки и перевозки. Эти затраты включают в себя единовременные и текущие затраты на транспорте (в части перевозки промышленной продукции) и в коммерческо-посреднических организациях (в части поставки и складирования этой продукции), расходы на складирование, погрузку и выгрузку продукции на складах предприятий-поставщиков и потребителей, средства, вложенные в составные элементы совокупного запаса продукции, а в отдельных случаях также производственные затраты у поставщиков и потребителей.

Обеспечивают минимизацию совокупных затрат в процессе товародвижения нормативы поставки продукции. Совокупные затраты могут устанавливаться через разработку этих нормативов. Они определяют объемы единовременной поставки, оптимизируемые по совокупным затратам. Следовательно, экономия совокупных затрат может быть предусмотрена в оперативных планах поставки и перевозки посредством включения в них оптимальных норм товародвижения.

В настоящее время объемы единовременной поставки продукции планируются обычно с учетом грузоподъемности транспортных средств как детерминированной величины, служащей основанием для формирования нормативов разовой отгрузки продукции. При разработке их пока недостаточно учитываются возрастающие

возможности использования контейнеров. Кроме того, единовременная перевозка может осуществляться несколькими видами транспорта (автопоездами, повагонными отправками) или, наоборот, мелкими партиями, которые меньше средней грузоподъемности транспортных средств.

Таким образом, разовые поставки нужно планировать, учитывая различные ситуации перевозки грузов, интересы не только транспорта, но и грузоотправителей, получателей, большое число показателей затрат на всех стадиях перемещения продукции.

Наряду с этим продолжает увеличиваться потребность в мелкопартионных поставках продукции, относительно возрастает удельный вес мелких отправок в общем количестве разовых отправок продукции. Величина единовременной поставки продукции может влиять на большое число показателей, учитываемых различными участниками процесса товародвижения. Причем показатели затрат могут изменяться в различной зависимости от размера поставки и поэтому должны учитываться в комплексе. Для комплексного учета влияния размера партии единовременной поставки на различные элементы затрат и практической реализации оптимизационных решений разработана новая модель, которая позволяет минимизировать совокупные затраты на перемещение продукции.

Цель формирования оптимальных партий поставки заключается в определении нормативной основы равномерной поставки и перевозки с минимальными совокупными затратами на процесс товародвижения. Сущность расчета, предусматривающего минимизацию указанных затрат при поставках продукции в необходимых объемах и в требуемые сроки, вытекает из достаточно характерных условий товародвижения.

По мере увеличения партии единовременной поставки возрастают запасы продукции на складах, текущие издержки по ее хранению и соответствующие единовременные затраты. Наряду с этим снижаются при неизменном расстоянии перевозки удельные расходы на транспортировку, погрузку продукции, ускоряется ее доставка и, следовательно, высвобождаются запасы продукции, находящейся в пути.

Таким образом, можно говорить о «губке затрат» (поглощаются затраты в одном месте и, выходят в другом) или о «губке времени» (сокращается время перевозки, но увеличивается время складирования). Для выполнения расчета используется алгоритм функционала затрат (Дроздов, 2019: 344–358).

Оптимальным будет такой объем единовременной поставки продукции, при котором по сравнению с другими возможными объемами обеспечиваются минимальные затраты на товародвижение. Установлено, что организация поставок оптимальными партиями обеспечивает экономию совокупных затрат при автомобильных перевозках металлопродукции на 7 — 20 %, лесопродукции — более 30 %, при железнодорожных перевозках металлопродукции — в среднем 22,2 % и лесопродукции — 18,7 % (Афанасьев, 2019: 19–21).

Предусматривается, что нормативы поставки могут устанавливаться по номенклатурным группам (относительно однородным по массе, габаритам, стоимости отдельных наименований продукции) на 3–5 лет, ежегодно корректироваться и дополняться с учетом изменившихся условий транспортно-складского обслуживания.

Накопление и внедрение нормативов поставки обеспечат комплексный учет затрат в процессе размещения складских предприятий. Если потребность в строительстве новых и реконструкции действующих складов будет определяться по совокупности нормативов, предусматривающих складскую форму поставок, то экономическая эффективность строительства сможет устанавливаться по показателям общих затрат на складирование продукции, в том числе у поставщика и потребителя.

Нормирование партий поставки продукции будет способствовать совершенствованию расчетов по выбору транзитной и складской форм поставки. До

последнего времени эти расчеты осуществлялись, как правило, с учетом действующих норм отгрузки и объемов материалопотребления.

В условиях же применения оптимальных норм поставки становится реальным определять выбор транзитной и складской форм поставки по совокупным затратам и дифференцирование с учетом всего многообразия условий перевозки и складирования продукции. Если в настоящее время альтернативой транзитной поставки при железнодорожной перевозке повагонными отправлениями служит обычно складская поставка, то в новых условиях возникнут широкие возможности для развития транзитных поставок в сборных железнодорожных вагонах и автомобилях.

Совершенствование расчетов по выбору транзитной и складской форм поставки должно послужить основанием для рационального распределения капиталовложений на строительство складов, развития контейнерного парка, производства специализированного подвижного состава. Межотраслевой подход к выбору форм товародвижения на стадии разработки нормативов позволит в комплексе решать вопросы по развитию транспорта и складского хозяйства. Нормирование поставок даст возможность учитывать совокупные затраты на товародвижение при выборе транспорта на стадиях текущего и оперативного планирования перевозок. Причем нормативы должны послужить основанием для определения не только эффективного в каждом отдельном случае вида транспорта, но и подвижного состава различной грузоподъемности, способа перевозок (маршрутами, повагонными и мелкими отправлениями) для конкретизации в планах сроков поставки продукции в течение квартала и месяца.

Для выполнения соответствующих расчетов в коммерческих службах целесообразнее всего применять тарифы за перевозки. Связано это с тем, что, во-первых, показатели затрат, исчисленные по тарифам, непосредственно касаются интересов предприятий и организаций, использующих транспорт, включаются в заготовительные и реализационные расходы. Во-вторых, по тарифам проводятся расчеты за перевозки и обеспечивается экономическая заинтересованность в сокращении транспортных расходов. Возможность увязки показателей, исчисленных по тарифам, с показателями совокупных затрат заключается в следующем.

Благодаря формированию первоначальной потребности в перевозках отдельными видами транспорта по нормативам поставки коммерческие службы будут располагать данными о структуре потребности в перевозках по видам отправок. Поэтому, определяя сводную потребность в перевозках, они должны оценивать эффективность видов транспорта по тарифам в зависимости не только от объема, расстояния перевозки, но и от размера разовых отгрузок, чтобы учитывать совокупные затраты на товародвижение.

Любое повышение транспортных тарифов (на перевозки в международном сообщении сырой нефти, черных и цветных металлов) является негативом для предприятий-экспортеров. Повышение скажется на росте цен на казахстанское сырье, сделав его менее привлекательным на международном рынке.

С одной стороны, по данным Министерства бюджетного планирования РК компания КТЖ обладает консолидированным непрозрачным бюджетом, в котором наверняка есть финансовые потоки, позволяющие держать тарифы на прежнем уровне. С другой стороны, по мнению КТЖ, сегодня дефицит бюджета компании в 23 млрд. тенге не позволяет ликвидировать накопленный с 1990-х годов объем физического износа основных средств. В 2023 году был осуществлен капитальный ремонт 400–420 км железнодорожных путей и приобретено около 3 тыс. вагонов. Затраты составили примерно 75 млрд. тенге, или 50 % инвестиционного бюджета. Между тем около 8 тыс. вагонов из имеющихся у компании 60 тыс. требуют капитального ремонта. При ежегодном росте грузооборота примерно на 5–7 % вагонного парка явно не хватает, а их покупка текущими темпами не покрывает потребностей. Покупка вагонов — это только поддержание и использование текущего

ресурса железнодорожных путей, которые тоже желательно модернизировать: увеличить пропускную способность железнодорожных линий, электрифицировать участки, обеспечить безопасность движения и в целом совершенствовать качество услуг.

Ожидается, что повышение цены приведет к адекватному повышению качества обслуживания и управления перевозками. КТЖ в 2023 году завершило электрификацию участка Экибастуз – Павлодар, окупаемость которой ожидается в течение 7–9 лет. Однако при нынешних ценах на нефть этот проект может окупиться за очень короткие сроки – буквально за 4 года.

Повышение тарифов действительно может повлиять на процесс ценообразования казахстанского ресурсного экспорта. Вместе с тем необходимо отметить, что эта привлекательная для покупателей цена формировалась за счет износа железнодорожных путей, вагонного состава, обслуживающей техники, которая все эти годы требовала обновления и модернизации, но не получала ее в нужной степени.

Еще следует отметить и то, что действующие казахстанские тарифы в 1,5–2 раза ниже, чем в России и в других странах СНГ. И даже предстоящее повышение не ликвидирует этот разрыв (Бодриков, 2015: 29–30).

Износ вагонов уже достигает критической отметки — 58 %, а линий сигнализации и связи — 82 %. Аргументы по поводу увеличения расходов на зарплату и дорогостоящие запчасти по праву можно считать классикой любого монополиста, подающего заявку на изменение тарифов в Агентстве Республики Казахстан по регулированию естественных монополий и защите конкуренции (АРЕМ РК). Между тем в условиях существующей инфляции АРЕМ РК стремится не допустить роста цен на услуги монопольного рынка, более тщательно анализируя состояние товарных рынков.

Важнейший элемент экономического обеспечения логистического управления товародвижением — экономическое стимулирование взаимодействия коммерческих служб с транспортом. В связи с этим стимулирование должно быть комплексным, распространяться на транспортные организации, осуществляющие перевозки, предусматривать экономическое воздействие на улучшение качества транспортного обслуживания, обоюдную заинтересованность в повышении эффективности поставок и перевозок, взаимную экономическую заинтересованность участников процесса товародвижения в улучшении показателей собственной хозяйственной деятельности. Все это в полной мере соответствует требованиям построения системы экономических взаимоотношений субъектов рынка товаров и транспортных услуг.

Существует несколько основных методов стимулирования. Один из них заключается в нормировании транспортных затрат. Действовавшая до сих пор система стимулирования экономии транспортных затрат имела ряд недостатков. Прежде всего она распространялась только на часть промышленной продукции, которая реализовывалась по ценам, включающим в себя расходы на перевозку. Не стимулировались закупочно - торговые и другие коммерческо-посреднические организации, планировавшие поставки продукции по ценам франко-пункт или франко- станция отправления, хотя, как и в других случаях, эти организации определяли величину транспортных затрат, возмещаемых потребителями.

Кроме того, система стимулирования ориентировалась на перевозку, осуществляемую одним из видов транспорта. Причем коммерческо-посреднические организации возмещали фактические транспортные расходы, например, при железнодорожной перевозке, а потребители — расходы по средним тарифам за перевозку. При такой системе снижается значение объекта стимулирования — транспортных расходов, выраженных в тарифах, даже при перевозке одним видом транспорта: показатели затрат, включенные в цены за продукцию, усреднены, несмотря на изменения, происходящие в транспортных тарифах.

Анализ недостатков в действовавшей системе стимулирования и возможность устранения их позволяют сформулировать условия нормирования транспортных затрат. Нормативами транспортных затрат служат затраты на перевозку единицы продукции, регулярно корректируемые, рекомендуемые для использования в закупочно-торговых и других коммерческо-посреднических организациях, если они участвуют в формировании хозяйственных связей. Нормативы должны стимулировать снижение транспортных расходов, в отличие от средних цен быть максимально дифференцированными по продуктовому и региональному (районам потребления) признакам, отражать различия в расходах на перевозку, связанные с многообразием грузопотоков и транспортных операций (Карсыбаев, 2020: 64–68).

Для определения нормативов принимаются затраты, реально возмещаемые потребителями. Следовательно, эти затраты включают в себя затраты на магистральную перевозку, рассчитаны по транспортным тарифам и зависят от конкретной схемы перевозки. Указанные нормативы необходимо разрабатывать с участием коммерческо-посреднических организаций с привлечением транспортных предприятий, а затем рекомендовать производственным объединениям-потребителям.

При наличии нормативов расчеты за поставку продукции могут осуществляться в следующем порядке. Потребители продукции, возмещая поставщикам фактические расходы на ее перевозку, положительную разницу между нормативными затратами и величиной этих расходов перечисляют коммерческо-посредническим организациям. Отрицательная разница, вызывающая увеличение себестоимости производства и не связанная с дополнительными требованиями к поставке со стороны потребителей, компенсируется путем отчисления им коммерческо-посредническими организациями части прибыли, получаемой за счет сокращения транспортных расходов.

Поэтому для грузоотправителей используются нормативы комплексных затрат на перевозку грузов, включающие в себя затраты на магистральную перевозку, определяемые транспортными тарифами, дополнительные расходы, зависящие от конкретной схемы перевозки, и затраты на погрузочно-экспедиционные операции. При этом условии образуется необходимая основа стимулирования грузоотправителей (в результате отчислений получателей от суммы сокращения возмещаемых ими затрат) в разработке самостоятельно или совместно с коммерческо-посредническими и транспортными организациями рациональных маршрутов перевозки (Плужников, 2023: 23; Миротин, 2018: 7–8; Лебедев, 2018: 3).

В остальных случаях для грузоотправителей (в том числе для складских предприятий) рекомендуются нормативы, непосредственно зависящие от расходов на погрузку и экспедирование. Для грузополучателей должны использоваться нормативы затрат на выгрузку продукции и перевозку, если она может осуществляться прогрессивными методами только при содействии потребителей продукции (например, централизованная перевозка грузов автомобильным транспортом), а также другие нормы затрат, если они зависят от грузоотправителей и получателей, и премиальные выплаты работникам, обеспечивающим сокращение затрат против установленных норм.

Одним из наиболее актуальных способов стимулирования становится повышение экономической ответственности за сокращение расстояния перевозки, предусмотренное договорами и оперативными планами поставки продукции, т.е. сокращение за счет этого транспортных затрат. Такой показатель может быть выражен через минимальное отношение объема перевозок, выполненных в строгом соответствии с оперативными планами грузоотправителей, ко всему объему перевозок или количества вагонов, предоставленных по оперативно-суточным планам, к общему числу используемых вагонов (на железнодорожном транспорте).

Важнейшими условиями улучшения качества транспортного обслуживания поставщиков и потребителей являются равномерный сбыт, отгрузка продукции оптимальными партиями. В данном случае объектами стимулирования становятся рациональная частота, равномерность поставки, расчетное число единовременных поставок в течение календарного периода, которое вытекает из соотношения объема перевозок и нормативов партий единовременной поставки продукции. По мере внедрения в хозяйственную практику указанных нормативов закупочно-торговые организации, промышленные предприятия - грузоотправители должны возмещать транспортным организациям материальные потери в случае сокращения рациональных объемов разовых отгрузок и нарушения равномерности отправки продукции. Например, по взаимной договоренности участников процесса товародвижения может быть установлена дополнительная плата за централизованную доставку грузов по согласованным с потребителями графикам, за организацию доставки материалов на строительные участки, минуя приобъектные склады. Если излишний простой транспортных средств при такой перевозке повышает ее себестоимость, то у потребителей сокращаются затраты на хранение продукции. Аналогичное значение имеют доплаты и в тех случаях, когда перевозки, необходимые для предприятий, оказываются нерентабельными для транспорта.

Транспортные предприятия могли бы широко пользоваться предоставленным им правом применять, когда это экономически целесообразно, пониженные тарифы для грузоотправителей, которые эффективней других используют транспорт. Они могли бы возмещать предприятиям и закупочно-торговым организациям расходы по увеличению режима работы складов. Такая мера имела бы решающее значение для обеспечения лучшего использования транспортных средств и равномерного предъявления грузов к перевозке.

### **Заключение**

Проведенное исследование было направлено на решение актуальной научно-практической задачи оптимизации логистических издержек в системе железнодорожных перевозок в условиях усложнения цепей поставок, роста объемов грузооборота и ограниченности инвестиционных ресурсов транспортных компаний. Поставленная цель — обоснование теоретических и практических подходов к оптимизации логистических издержек на основе концепции совокупных затрат и логистического управления цепями поставок — в ходе исследования была в целом достигнута.

В рамках работы цели и задачи исследования были реализованы посредством применения системного, процессного и логистического подходов, а также комплекса экономико-статистических, аналитических и оптимизационных методов. Использование системного анализа позволило рассмотреть железнодорожные перевозки как элемент интегрированной транспортно-логистической системы, в которой формируются и взаимодействуют материальные, финансовые и информационные потоки. Экономико-статистические методы и сравнительный анализ обеспечили выявление динамики и структуры логистических издержек, а логистическое моделирование и методы оптимизации — обоснование направлений минимизации совокупных затрат без ухудшения качества транспортного обслуживания.

В ходе исследования были получены следующие основные результаты. Во-первых, уточнена экономическая сущность логистических издержек в системе железнодорожных перевозок и показано, что традиционный подход, ориентированный преимущественно на анализ перевозочных расходов, не позволяет в полной мере выявить резервы повышения эффективности деятельности перевозчика. Обосновано, что логистические издержки должны рассматриваться по всей цепи товародвижения — от закупки материальных ресурсов и формирования запасов до транспортировки, складирования и реверсивных потоков.

Во-вторых, на основе анализа статистических и отчетных данных железнодорожного транспорта Республики Казахстан за 2021–2023 гг. выявлены ключевые тенденции формирования логистических затрат. Установлено, что при росте объемов перевозок и грузооборота наблюдается опережающий рост логистических издержек, особенно в части закупочной логистики, контейнерных перевозок, погрузочно-разгрузочных операций и охраны грузов. Это свидетельствует о необходимости пересмотра существующих механизмов планирования, учета и контроля затрат, а также о недостаточной интеграции транспортных и закупочных функций в рамках единой логистической политики.

В-третьих, доказано, что существенное влияние на себестоимость транспортных услуг оказывает соотношение переменных и условно-постоянных расходов. Обосновано, что расходы на организацию закупок и движение материальных ресурсов носят смешанный характер и требуют более гибкого подхода к их классификации и управлению. Показано, что использование экономико-математических моделей зависимости затрат от объемов перевозок позволяет повысить точность планирования и выявить дополнительные резервы снижения себестоимости.

В-четвертых, подтверждена выдвинутая в работе гипотеза о том, что внедрение комплексного логистического управления, ориентированного на минимизацию совокупных затрат по всей цепи поставок, способствует снижению логистических издержек железнодорожных перевозок без ухудшения качества транспортного обслуживания. Это подтверждается результатами анализа структуры затрат, а также расчетами, показывающими экономический эффект от оптимизации партий поставки, развития контейнеризации и сокращения сверхнормативных запасов материально-технических ценностей.

В-пятых, разработаны практические предложения по совершенствованию учета и анализа логистических издержек в железнодорожных компаниях. Обоснована целесообразность выделения логистических затрат, включая затраты на закупочную деятельность, в самостоятельную статью в структуре себестоимости. Предложена форма отчетности по логистическим затратам на закупки, позволяющая повысить прозрачность затрат, усилить контроль за формированием запасов и создать информационную базу для принятия управленческих решений.

Сформулированные выводы позволяют утверждать, что научное знание в области управления логистическими издержками на железнодорожном транспорте было дополнено и уточнено. В отличие от существующих исследований, в работе предложен комплексный подход к анализу затрат, основанный на концепции совокупных издержек и ориентированный на интеграцию транспортных, закупочных и складских процессов. Это обеспечивает более полное выявление резервов повышения эффективности транспортно-логистической системы и расширяет возможности практического применения логистических инструментов в деятельности железнодорожных компаний.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием методов цифровизации логистического управления, внедрением автоматизированных систем мониторинга логистических затрат и расширением применения экономико-математических моделей оптимизации в условиях неопределенности спроса и нестабильности внешней среды. Особый интерес представляет исследование влияния цифровых платформ, интеллектуальных транспортных систем и технологий «больших данных» на снижение совокупных логистических издержек и повышение устойчивости железнодорожных перевозок.

Практическое применение полученных результатов возможно в деятельности национальных и региональных железнодорожных компаний при формировании бюджетов затрат, разработке тарифной политики, планировании закупок и управлении

материальными запасами. Реализация предложенных рекомендаций позволит повысить экономическую эффективность железнодорожных перевозок, снизить уровень логистических издержек и укрепить конкурентные позиции железнодорожного транспорта в системе национальной и международной логистики.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Перешина, 2021 — Экономика железнодорожного транспорта / Под ред. Н.П. Перешинной, Б.М. Лapidуса, М.Ф. Трихункова. — М.: УМК МПС России. — 2021. — 600 с. [Russ.]
- Смехова, 2023 — Смехова Н.Г., Купоров А.И., Кожевников Ю.Н. и др. Себестоимость железнодорожных перевозок. — М.: Маршрут. — 2023. — 494 с. [Russ.]
- Дроздов, 2019 — Дроздов П.А. Логистика: учебное пособие. — Минск: Вышэйшая школа. — 2019. — 429 с. [Russ.]
- Прокофьева, 2018 — Прокофьева Т.А., Платонов С.Ю. Проблемы финансирования и оценки эффективности инвестиционных проектов и программ развития транспортно-логистической инфраструктуры. // Логистика сегодня. — 2018. — № 3. — С. 2–14. [Russ.]
- Афанасьев, 2019 — Афанасьев М.В. Логистика в системе государственных закупок. // Интегрированная логистика. — 2019. — № 1. — С. 19–21. [Russ.]
- Бодриков, 2015 — Бодриков М.В. Экономические аспекты логистики. // Интегрированная логистика. — 2015. — № 1. — С. 29–30. [Russ.]
- Карсыбаев, 2020 — Карсыбаев Е.Е., Карибжанов О. Тенденции совершенствования инструментария логистического управления цепью поставок // Магистраль. — 2020. — № 7. — С. 64–68. [Russ.]
- Плужников, 2023 — Плужников К.И. Глобализация производства и распределения транспортных услуг// Бюллетень транспортной информации. — 2023. — № 5. — С. 23. [Russ.]
- Миротин, 2018 — Миротин Л.Б., Некрасов А.Г. Стратегия интегрированных цепей поставок на транспорте // Интегрированная логистика. — 2018. — № 2. — С. 7–8. [Russ.]
- Лебедев, 2018 — Лебедев Ю.Г. Теория гармонизированных цепей поставок – новая парадигма логистики // Интегрированная логистика. — 2018. — № 1. — С. 3. [Russ.]

#### REFERENCES

- Pereshina, 2021 — Pereshina, N.P., Lapidus, B.M., Trikhunkov, M.F. (eds.) (2021). *Ekonomika zheleznodorozhnogo transporta* [Economics of railway transport]. — M.: UMC MPS Rossii. — 600 p. [in Russ.]
- Smekhova, 2023 — Smekhova, N.G., Kuporov, A.I., Kozhevnikov, Yu.N., et al. (2023). *Sebestoimost' zheleznodorozhnykh perevozok* [Cost of railway transportation]. — M.: Marshrut. — 494 p. [in Russ.]
- Drozdov, 2019 — Drozdov, P.A. (2019). *Logistika: uchebnoe posobie* [Logistics: textbook]. — Minsk: Vyssheysheyshaya shkola. — 429 p. [in Russ.]
- Prokofyeva, 2018 — Prokofyeva, T.A., Platonov, S.Yu. (2018). *Problemy finansirovaniya i otsenki effektivnosti investitsionnykh proektov i programm razvitiya transportno-logisticheskoi infrastruktury* [Problems of financing and evaluating the efficiency of investment projects and transport-logistics infrastructure development programs]. — *Logistika segodnya*, 3, 2–14. [in Russ.]
- Afanasyev, 2019 — Afanasyev, M.V. (2019). *Logistika v sisteme gosudarstvennykh zakupok* [Logistics in the system of public procurement]. — *Integrirrovannaya logistika*, 1, 19–21. [in Russ.]
- Bodrikov, 2015 — Bodrikov, M.V. (2015). *Ekonomicheskie aspekty logistiki* [Economic aspects of logistics]. — *Integrirrovannaya logistika*, 1, 29–30. [in Russ.]
- Karsybaev, 2020 — Karsybaev, E.E., Karibzhanov, O. (2020). *Tendentsii sovershenstvovaniya instrumentariya logisticheskogo upravleniya tsep'y u postavok* [Trends in improving logistics management tools of the supply chain]. — *Magistral*, 7, 64–68. [in Russ.]
- Pluzhnikov, 2023 — Pluzhnikov, K.I. (2023). *Globalizatsiya proizvodstva i raspredeleniya transportnykh uslug* [Globalization of production and distribution of transport services]. — *Byulleten' transportnoi informatsii*, 5, 23. [in Russ.]
- Mirotin, 2018 — Mirotin, L.B., Nekrasov, A.G. (2018). *Strategiya integrirovannykh tsepei postavok na transporte* [Strategy of integrated supply chains in transport]. — *Integrirrovannaya logistika*, 2, 7–8. [in Russ.]
- Lebedev, 2018 — Lebedev, Yu.G. (2018). *Teoriya garmonizirovannykh tsepei postavok – novaya paradigma logistiki* [Theory of harmonized supply chains – a new logistics paradigm]. — *Integrirrovannaya logistika*, 1, 3. [in Russ.]

## COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRENGTH OF AUTOMOBILE WHEELS UNDER IMPACT LOADS

*A.P. Karpov, A.G. Seisenqozha\**

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: [seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz](mailto:seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz)

**Alexander Karpov** — PhD, Assistant to Associate Professor, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [karpov.aleksandr@mtgu.edu.kz](mailto:karpov.aleksandr@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-8795-0233>;

**Aslan Seisenqozha** — master student, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan

E-mail: [seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz](mailto:seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-5864-5707>.

© A.P. Karpov, A.G. Seisenqozha

**Abstract.** Modern automotive engineering is characterized by increasingly stringent requirements for safety, reliability, and durability of vehicle chassis components. One of the most critical structural elements of a vehicle is the wheel, which is subjected during operation not only to static loads but also to significant dynamic and impact loads caused by collisions with obstacles. The widespread use of cast aluminum wheels has intensified the need for reliable methods to assess their strength under certification impact test conditions. Despite the existence of regulatory standards, numerical modeling of the stress–strain state of wheels under impact loading remains insufficiently developed. The aim of this study is to develop and verify a computational–experimental methodology for evaluating the stress–strain state of cast aluminum automotive wheels subjected to impact loads simulating certification test conditions. To achieve this goal, an analysis of relevant standards was conducted, a finite element model of a virtual impact test bench was developed, nonlinear dynamic simulations of impact loading were performed, and the numerical results were compared with experimental strain gauge measurements. An additional objective was to assess the applicability of the dynamic coefficient commonly used in engineering practice. As a result of the study, spatial and temporal distributions of stresses and strains in the wheel structure under an oblique impact at an angle of 30° were obtained. It was found that the regions of maximum deformation predicted by the numerical model coincide with the zones of residual plastic deformation observed during post-test inspections. Comparison between numerical and experimental results demonstrated that the discrepancy in strain values at control points does not exceed 10–11 %, which is within acceptable engineering accuracy limits. Good agreement was also achieved for the main parameters of the oscillatory process, including the period, frequency, and logarithmic decrement of damping. In conclusion, the proposed computational–experimental methodology provides a reliable assessment of automotive wheel strength under impact loading and can be effectively applied during the design stage and preparation for certification tests. The use of a dynamic coefficient is acceptable for preliminary evaluations; however, direct numerical simulation of the impact process is recommended for final strength assessment.

**Keywords:** automotive wheel; impact loading; stress–strain state; finite element method; LS-DYNA; dynamic coefficient



**For citation:** A.P. Karpov, A.G. Seisenqozha. Computational and Experimental Study of the Strength of Automobile Wheels under Impact Loads//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 84. Pp. 89–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.007>.

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

## АВТОМОБИЛЬ ДӨНГЕЛЕКТЕРІНІҢ СОҚҚЫ ЖҮКТЕМЕЛЕРІНІҢ ӘСЕРІ КЕЗІНДЕГІ БЕРІКТІГІН ЕСЕПТІК-ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ

*А.П. Карпов, А.Ф. Сейсенқожа\**

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: [seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz](mailto:seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz)

**Александр Карпов** — PhD, қауымдастырылған профессордың ассистенті, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [karpov.aleksandr@mtgu.edu.kz](mailto:karpov.aleksandr@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-8795-0233>;

**Аслан Сейсенқожа** — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: [seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz](mailto:seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-5864-5707>.

© А.П. Карпов, А.Ф. Сейсенқожа

**Аннотация.** Қазіргі заманғы автомобиль жасауда көлік құралдарының қауіпсіздігі мен сенімділігіне қойылатын талаптар жыл сайын артып келеді. Автомобиль конструкциясындағы ең жауапты элементтердің бірі – дөңгелек, ол пайдалану барысында статикалық қана емес, сонымен қатар кедергілерге соғылған кезде пайда болатын елеулі соққылы және динамикалық жүктемелерді қабылдайды. Алюминий қорытпасынан құйылған дөңгелектердің кеңінен қолданылуына байланысты олардың беріктігін сертификаттау сынақтары жағдайында дәл бағалау әдістерін әзірлеу өзекті болып табылады. Қолданыстағы нормативтік талаптардың болуына қарамастан, соққылы жүктемелер кезіндегі кернеулі-деформацияланған күйді есептік модельдеу жеткілікті деңгейде дамымаған. Осы зерттеудің мақсаты – сертификаттау сынақтарын модельдейтін соққылы жүктемелер әсеріндегі құйма алюминий автомобиль дөңгелектерінің кернеулі-деформацияланған күйін анықтаудың есептік-эксперименттік әдістемесін әзірлеу және верификациялау. Қойылған мақсатқа жету үшін нормативтік құжаттарға талдау жүргізілді, виртуалды сынақ стендінің соңғы элементтер әдісіне негізделген моделі жасалды, соққылы жүктеме жағдайында сызықтық емес динамикалық есептеулер орындалды және есептік нәтижелер натуралды тензометриялық эксперимент деректерімен салыстырылды. Сонымен қатар инженерлік тәжірибеде қолданылатын динамикалық коэффициенттің қолданылу мүмкіндігі бағаланды. Зерттеу нәтижесінде дөңгелек құрылымындағы деформациялар мен кернеулердің кеңістіктік-уақыттық таралуы алынды. Есептік модельде анықталған максимал деформация аймақтары эксперименттен кейін тіркелген қалдық пластикалық деформация аймақтарымен толық сәйкес келетіні анықталды. Есептік және эксперименттік деректердің салыстырылуы деформация мәндерінің айырмашылығы 10–11 % шегінде екенін көрсетті, бұл инженерлік тұрғыдан рұқсат етілетін дәлдікке сәйкес келеді. Тербелмелі процестің негізгі параметрлері бойынша да жақсы сәйкестік байқалды. Қорытындылай келе, ұсынылған есептік-эксперименттік әдістеме автомобиль дөңгелектерінің соққылы жүктемелерге беріктігін сенімді бағалауға мүмкіндік береді және жобалау мен сертификаттау сынақтарына дайындық кезінде қолдануға жарамды. Динамикалық коэффициентті алдын ала бағалау үшін қолдануға болады, алайда беріктікті түпкілікті анықтау үшін соққы процесін тікелей сандық модельдеу ұсынылады.

**Түйін сөздер:** автомобиль дөңгелегі; соққылы жүктеме; кернеулі-деформацияланған күй; соңғы элементтер әдісі; LS-DYNA; динамикалық коэффициент

**Дәйексөздер үшін:** А.П. Карпов, А.Ф. Сейсенқожа. Автомобиль дөңгелектерінің соққы жүктемелерінің әсері кезіндегі беріктігін есептік-эксперименттік зерттеу//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 84. 89–107 бет. (Орыс. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.007>.

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

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ КОЛЕС АВТОМОБИЛЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ НАГРУЗОК

*А.П. Карпов, А.Ф. Сейсенқожа\**

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: [seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz](mailto:seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz)

**Александр Карпов** — PhD, ассистент ассоциированного профессора, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: [karpov.aleksandr@mtgu.edu.kz](mailto:karpov.aleksandr@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-8795-0233>;

**Аслан Сейсенқожа** — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: [seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz](mailto:seisenqozha.aslan@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0000-5864-5707>.

© А.П. Карпов, А.Ф. Сейсенқожа

**Аннотация.** Современное автомобилестроение характеризуется повышенными требованиями к безопасности и надежности элементов ходовой части транспортных средств. Одним из наиболее ответственных элементов конструкции автомобиля является колесо, которое в процессе эксплуатации подвергается воздействию значительных динамических и ударных нагрузок, особенно при наезде на препятствия. В связи с широким применением литых алюминиевых колес возрастает необходимость разработки достоверных методов оценки их прочности в условиях сертификационных испытаний. Несмотря на наличие нормативных требований, расчетное моделирование напряженно-деформированного состояния колес при ударных нагрузках до настоящего времени остается недостаточно разработанным. Целью настоящего исследования является разработка и верификация расчетно-экспериментальной методики оценки напряженно-деформированного состояния литых алюминиевых автомобильных колес при ударных нагрузках, моделирующих условия сертификационных испытаний. Для достижения поставленной цели в работе выполнен анализ нормативной базы, разработана конечно-элементная модель виртуального испытательного стенда, проведено нелинейное динамическое моделирование ударного нагружения и выполнено сопоставление расчетных данных с результатами натурных тензометрических экспериментов. Дополнительной задачей являлась оценка применимости коэффициента динамичности для инженерной оценки сопротивления колес удару. В результате проведенного исследования получены пространственно-временные распределения деформаций и напряжений в конструкции колеса при косом ударе под углом 30°. Установлено, что зоны максимальных деформаций, выявленные в расчетной модели, совпадают с областями остаточных пластических деформаций, зафиксированных экспериментально. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что расхождение значений деформаций в контрольных точках не превышает 10–11 %, что соответствует инженерно допустимому уровню погрешности. Также получено



удовлетворительное согласование параметров колебательного процесса, включая период, частоту и логарифмический декремент затухания. В заключение сделан вывод о том, что предложенная расчетно-экспериментальная методика обеспечивает достоверную оценку прочности автомобильных колес при ударных нагрузках и может быть использована при проектировании и подготовке к сертификационным испытаниям. Использование коэффициента динамичности допустимо для предварительного анализа, однако для окончательной оценки прочности предпочтительно применять прямое численное моделирование ударного процесса.

**Ключевые слова:** автомобильное колесо; ударная нагрузка; напряженно-деформированное состояние; метод конечных элементов; LS-DYNA; коэффициент динамичности

**Для цитирования:** А.П. Карпов, А.Ф. Сейсенқожа. Расчетно-экспериментальное исследование прочности колес автомобилей под действием ударных нагрузок//Промышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 84. Стр. 89–107. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.007>.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Введение

Современное автомобилестроение характеризуется постоянным ужесточением требований к безопасности, надежности и эксплуатационной долговечности элементов ходовой части транспортных средств. Одним из наиболее ответственных и нагруженных элементов конструкции автомобиля является колесо, которое в процессе эксплуатации воспринимает как статические, так и значительные динамические нагрузки, в том числе ударного характера при наезде на препятствия. Особенно это актуально для литых алюминиевых колес, широко применяемых в автомобилях категории М1, благодаря их сниженной массе и высоким эксплуатационным характеристикам (ГОСТ Р 52390–2005, 2007: 1–30).

Обоснование выбора темы исследования связано с наличием проблемной ситуации в области оценки прочности колес автомобилей при ударных нагрузках. Несмотря на наличие нормативных требований и регламентированных методик сертификационных испытаний, расчетное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) колес в условиях ударного нагружения до настоящего времени остается недостаточно разработанным. В ряде работ предлагается использовать экспериментально определяемый коэффициент динамичности для оценки сопротивления колес удару (Миронова, 2012: 5–130; Демьянушко и др., 2012: 42–49), однако универсальность такого подхода вызывает сомнения при изменении геометрии колеса, свойств материала или параметров испытательного стенда.

Актуальность темы исследования обусловлена, с одной стороны, возрастающим интересом к численным методам анализа прочности конструкций в условиях динамического и ударного нагружения, а с другой — отсутствием комплексных расчетно-экспериментальных методик, позволяющих адекватно учитывать реальные условия сертификационных испытаний колес. Практическая значимость исследования заключается в возможности повышения точности оценки несущей способности колес на этапе проектирования и снижении затрат на экспериментальную доводку конструкции. Теоретическая значимость определяется развитием методов нелинейного динамического конечно-элементного анализа применительно к задачам удара с учетом волновых процессов и скоростной чувствительности материалов (Hallquist, 1998: 200–485; Hallquist, 2007: 1226–3006).

Объектом исследования являются литые алюминиевые автомобильные колеса, подвергающиеся ударным нагрузкам в условиях сертификационных испытаний. Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние автомобильного

колеса при косом ударе под углом  $30^\circ$  с учетом динамического характера нагружения и взаимодействия с элементами испытательного стенда.

Целью исследования является разработка и верификация расчетно-экспериментальной методики определения НДС автомобильных колес при ударных нагрузках, обеспечивающей обоснованную оценку их прочности и сопротивления разрушению. Достижение поставленной цели предполагает доказательство тезиса о возможности адекватного численного моделирования ударных испытаний колес без использования обобщенного коэффициента динамичности либо с его обоснованной проверкой.

Для достижения цели в работе поставлены следующие задачи:

- проанализировать существующие нормативные требования и экспериментальные методики испытаний колес на удар;
- разработать конечно-элементную модель виртуального испытательного стенда с учетом его конструктивных и жесткостных характеристик;
- выполнить нелинейный динамический расчет НДС колеса при ударе с использованием современных моделей упрочнения материалов;
- сопоставить результаты расчетов с экспериментальными данными тензометрических измерений;
- оценить применимость коэффициента динамичности для инженерной оценки сопротивления колес ударным нагрузкам.

Методологическую основу исследования составляют методы механики сплошных сред, теории удара и колебаний, численные методы нелинейной динамики, а также метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе LS-DYNA. В качестве моделей упрочнения материала используется зависимость Купера–Саймондса, адекватная диапазону скоростей деформаций, характерных для рассматриваемых условий удара.

В качестве рабочей гипотезы исследования выдвигается предположение о том, что детальное численное моделирование условий сертификационных ударных испытаний, включая элементы испытательного стенда и реальные диаграммы деформирования материалов, позволяет получить результаты НДС колеса, сопоставимые с экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей инженерно допустимых значений.

Научная новизна исследования заключается в разработке комплексной расчетно-экспериментальной методики анализа НДС автомобильных колес при ударных нагрузках, а практическая значимость — в возможности использования полученных результатов при проектировании и сертификации колес автомобильной техники.

#### **Материалы и методы**

В рамках настоящей работы рассматриваются следующие исследовательские вопросы:

- Насколько адекватно численное моделирование в нелинейной динамической постановке позволяет воспроизвести напряженно-деформированное состояние литого алюминиевого автомобильного колеса при сертификационных ударных испытаниях?
- Каково влияние конструктивных и жесткостных характеристик испытательного стенда на результаты расчетного и экспериментального анализа?
- Возможна ли корректная оценка прочности колес при ударных нагрузках без применения эмпирического коэффициента динамичности либо с его обоснованной верификацией?
- Какова степень сходимости расчетных и экспериментальных данных по величинам деформаций и параметрам колебательного процесса?

В качестве рабочей гипотезы выдвигается предположение о том, что детализированное численное моделирование сертификационных ударных испытаний автомобильных колес, выполненное с учетом реальных конструктивных параметров испытательного стенда, контактных взаимодействий, волновых процессов и скоростной чувствительности материала,

позволяет получить значения напряженно-деформированного состояния, сопоставимые с результатами натуральных экспериментов с погрешностью, не превышающей инженерно допустимые значения.

Дополнительно предполагается, что коэффициент динамичности может использоваться лишь для предварительной инженерной оценки, тогда как окончательное заключение о прочности колеса должно основываться на прямом моделировании ударного процесса.

Объектом исследования является литое алюминиевое автомобильное колесо типоразмера 7Jx16", относящееся к колесам транспортных средств категории М1. Выбор данного объекта обусловлен его типовой конструкцией, широким применением в серийных автомобилях, а также наличием обширной экспериментальной базы результатов тензометрических измерений, полученных в ходе ранее проведенных сертификационных испытаний.

Материал колеса — алюминиевый литейный сплав, механические характеристики которого заданы на основе экспериментальных диаграмм деформирования при статическом и динамическом нагружении. В расчетной модели учитывались следующие параметры материала: модуль упругости, коэффициент Пуассона, плотность, предел текучести, характеристики пластического упрочнения и демпфирующие свойства. Скоростная чувствительность материала описывалась с использованием модели упрочнения Купера–Саймондса, адекватной диапазону скоростей деформаций до  $102 \text{ с}^{-1}$ – $1102 \text{ с}^{-1}$ , характерных для рассматриваемых условий удара.

Экспериментальный материал исследования включает результаты статического и динамического тензометрирования, выполненного на сертификационном ударном стенде при косом ударе под углом  $30^\circ$ , а также данные визуального контроля остаточных деформаций колеса после испытаний.

Исследование проводилось поэтапно и включало следующие основные этапы:

Аналитический этап, включающий анализ нормативных документов, регламентирующих испытания колес на удар (ГОСТ Р 52390–2005), а также обзор отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных расчету и экспериментальному исследованию прочности колес при динамических нагрузках.

Экспериментальный этап, в рамках которого были использованы результаты сертификационных ударных испытаний колес на специализированном стенде с применением тензометрических методов измерения деформаций.

Расчетный этап, включающий разработку конечно-элементной модели колеса и виртуального испытательного стенда, задание контактных и граничных условий, моделирование ударного нагружения в нелинейной динамической постановке.

Этап верификации, заключающийся в сопоставлении расчетных и экспериментальных данных по максимальным деформациям, их пространственному распределению и параметрам колебательного процесса.

Обобщающий этап, направленный на анализ применимости коэффициента динамичности и формулирование выводов о достоверности и практической ценности предложенной методики.

В работе использован комплекс взаимодополняющих теоретических, численных и экспериментальных методов исследования:

- методы механики сплошных сред, теории удара и теории колебаний;
- метод конечных элементов для моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции;
- методы нелинейной динамики с явным интегрированием уравнений движения;
- контактные алгоритмы с учетом трения и перехода от статического к динамическому режиму;

- модели пластического упрочнения материалов с учетом скорости деформации (модель Купера–Саймондса);
- методы тензометрического анализа для экспериментального определения деформаций;
- методы сравнительного анализа и статистической обработки результатов.

Численное моделирование выполнено с использованием лицензионного программного комплекса LS-DYNA, реализующего лагранжеву постановку задачи и явный метод интегрирования уравнений динамики. Расчетная модель включала основные элементы испытательного стенда, нагружающую систему, опорную конструкцию и болтовое соединение колеса, что позволило максимально приблизить условия виртуального эксперимента к натурным испытаниям.

Новизна методологического подхода заключается в комплексном моделировании ударных испытаний автомобильных колес с явным учетом конструктивных и жесткостных характеристик испытательного стенда, что в большинстве ранее опубликованных работ не рассматривалось либо учитывалось в упрощенной форме. Впервые в рамках одной расчетно-экспериментальной схемы выполнено сопоставление не только максимальных деформаций, но и параметров волновых процессов, включая период, частоту и логарифмический декремент затухания.

Использование реальных диаграмм деформирования материалов и скоростной чувствительности позволило повысить достоверность расчетных результатов и обосновать границы применимости эмпирического коэффициента динамичности в инженерной практике.

#### **Результаты и обсуждение**

В соответствии с ГОСТ Р 52390-2005 (ГОСТ Р 52390-2005, 2007: 1–30) испытания на определение сопротивления колеса удару в двух вариантах, под углом  $30^\circ$  и  $13^\circ$  соответственно, являются обязательными для всех типов колес из алюминиевых сплавов. В данной работе рассмотрен вариант ударного нагружения колеса при его расположении под углом  $30^\circ$  к направлению удара. Выбранные для анализа испытания моделируют нагрузки, действующие на колесо при наезде автомобиля массой 1 т на неподвижное препятствие под углом  $30^\circ$ . Скорость автомобиля в момент имитируемого наезда составляет 60 км/ч. Данный режим испытаний был выбран на основе многолетнего опыта наблюдений, который показал, что среднее значение угла заноса при наезде на препятствие составляет  $27,6^\circ$ . Методика расчетного анализа НДС колес при ударном воздействии под углом  $13^\circ$  не будет отличаться от анализируемой, за исключением моделирования некоторых деталей виртуального испытательного стенда.

В структуре комплексного анализа прочности колеса расчет НДС под действием ударных нагрузок рекомендуется выполнять на завершающей стадии, когда по результатам предварительных статических расчетов и расчета на усталостную прочность уже выполнена основная доводка конструкции.

До настоящего времени динамический расчет колеса при ударе в условиях стенда не проводился. В недавнем исследовании, результаты которого приводятся в работах (Демьянушко, 2012: 42–49; Миронова, 2012: 5–130), для оценки прочности колеса при ударе было предложено использовать коэффициент динамичности, полученный по экспериментальному тензометрическому анализу и результатам выполненного совместно с автором настоящей работы статического расчета. Адекватность экспериментального единого коэффициента динамичности  $K_d$ , хотя его использование и является передовым решением на сегодняшнем этапе, всегда может вызывать сомнения при изменении геометрии или свойств материала колеса. Расчетный анализ рекомендуется проводить путем моделирования условий ударного нагружения колеса без шины на стандартном стенде для сертификационных испытаний на удар. Влияние шины на деформированное состояние колеса при ударе вообще говоря различно для колес различного типа, зависит от стенда, угла установки колеса и характеристик шины. Отмечено рядом исследователей, что при испытаниях колес с

установкой под  $30^\circ$  влияние шины не значительно. Так как экспериментальные исследования НДС проводились при ударе без шины, то и расчетный анализ в настоящем исследовании проведен без учета шины.

Разработанная в данном исследовании методика расчета НДС колеса при ударном нагружении позволяет получать данные по НДС колеса любой конструкции при ударе и производить заключительную корректировку конструкции на расчетных моделях. Это позволяет также проверить обоснованность применения  $K_d$  для приближенной инженерной оценки.

В качестве объекта анализа рассмотрено ударное нагружение литого алюминиевого колеса 7Jx16", расчетный анализ усталостной прочности которого приведен в Главе 3. Это колесо, как уже указывалось выше, принадлежит к типовым конструкциям и, кроме того, выбрано в связи с наибольшим количеством экспериментальных данных, полученных в (Миронова, 2012: 5–130). Аналогичным образом могут быть проведены расчеты любой конструкции.

В соответствии с требованиями сертификационных испытаний (ГОСТ Р 52390–2005, 2007: 1–30), опорная площадка стенда установлена под углом  $30^\circ$  к горизонтальной плоскости. Колесо закрепляется на опорной площадке пятью крепежными болтами с моментом затяжки 110 Н·м. Нагружающая система состоит из двух грузов, связанных между собой пружиной (одной, как в рассмотренном стенде, или несколькими) суммарной жесткостью 0,9...1,3 кН/мм с предварительным сжатием 6 мм. Масса основного груза 3 равна 910 кг, дополнительного 4 – 100 кг. Наличие пружин в системе нагружающих элементов позволяет имитировать работу подвески автомобиля. В использованном во время испытаний стенде нагрузка передается через дополнительно установленный подпятник с размерами ударной плоскости 125×375 мм.

В КЭ-расчетной схеме виртуальных испытаний на удар колесо находится в контакте с опорой стенда, расположенной под углом  $30^\circ$  к горизонтальной плоскости (схема опоры приведена на рисунке 1). Система цилиндров 2, в т.ч. сплошной опорный, непосредственно контактирующий с привалочной плоскостью колеса, выполнены из объемных элементов для надлежащего учета массы системы. Сварная конструкция опорных швеллеров стенда выполнена из оболочечных элементов. Неподвижность системы цилиндров относительно швеллеров обеспечена за счет «клеевого контакта» между деталями.

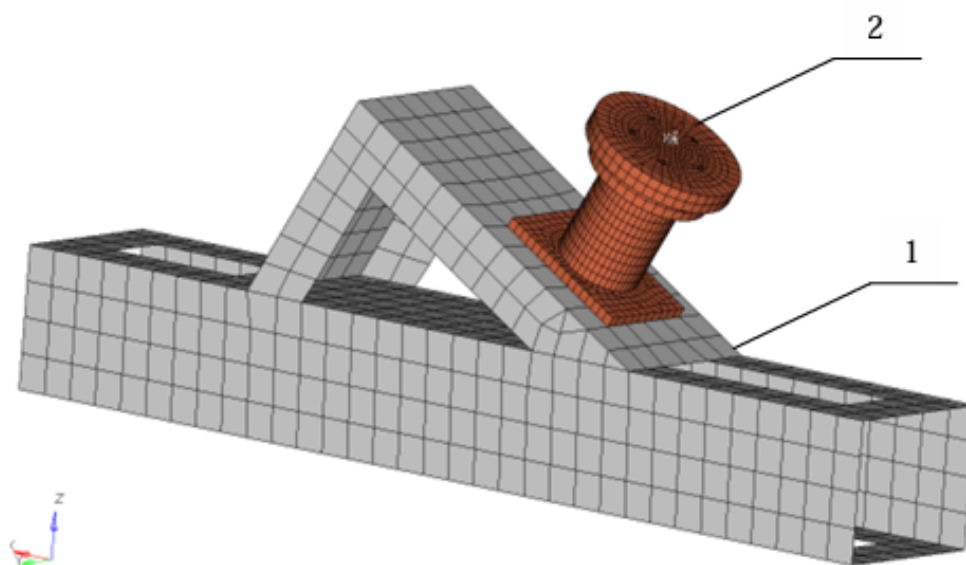


Рис. 1. КЭ-расчетная схема опоры испытательного стенда

Полная КЭ-расчетная схема показана на рисунке 2, а. Согласно схеме испытаний (Рис. 2), ударный груз состоит из трех частей, выполненных с помощью 8-узловых гексагональных элементов: жесткого ударного элемента массой 100 кг (3), основной массы 910 кг (5) и соединительной пружины (4) жесткостью 1,3 кН/мм. Жесткость пружины в расчете используется максимально возможная согласно требованиям ГОСТ (ГОСТ Р 52390–2005, 2007: 1–30) к конструкции испытательного стенда.

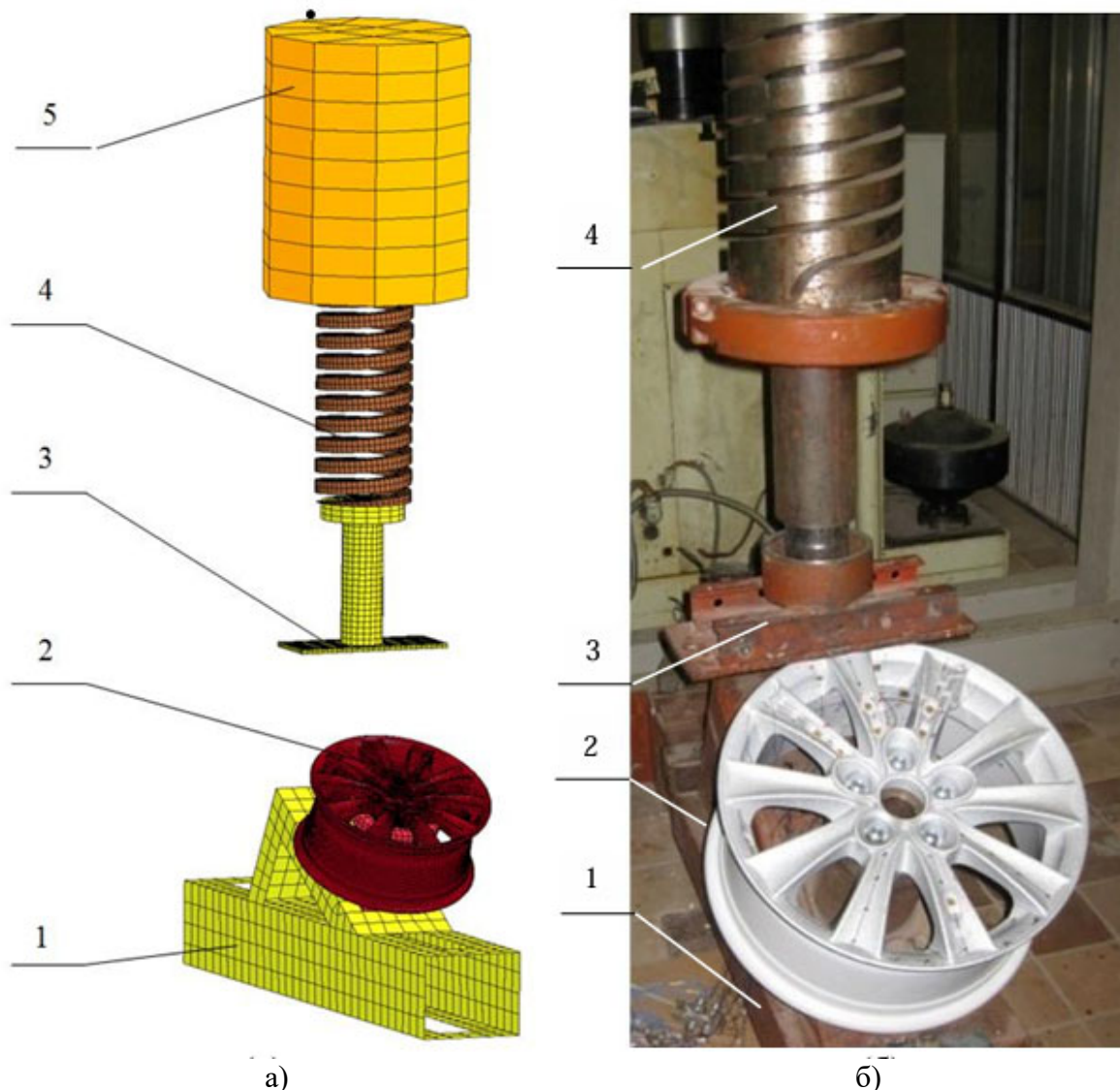


Рис. 2. а) Расчетная схема исследования НДС литого колеса 7Jx16” при ударе и вид испытательного стенда с установленным колесом и тензорезисторами: 1 - опорная площадка; 2 - колесо; 3 - ударный элемент; 4 - соединительная пружина; 5 - основной груз; б) фото стенда с установленным колесом с тензорезисторами.

Связь колеса с площадкой стенда обеспечивается за счет приложения эквивалентной силы, вычисленной согласно формуле 1, к системе жестких балочных элементов с двух сторон:

$$F = \frac{M_3}{\frac{1}{2}(d\mu_p + \frac{t}{\pi}) + \frac{\mu_T(D^3 - D_0^3)}{3\cos\alpha(D^2 - D_0^2)}}, \quad (1)$$

где  $M_3$  – момент затяжки;

$\mu_p$  – коэффициент трения в резьбе;

$\mu_T$  – коэффициент трения между коническими поверхностями колеса и головкой болта;

$d$  – средний диаметр резьбы крепежного болта;

$t$  – шаг резьбы;

$D$  – наружный диаметр конической поверхности;

$D_0$  – внутренний диаметр конической поверхности;

$\alpha$  – угол наклона образующей конической поверхности

Система выполнена в соответствии с методикой моделирования болтового соединения, изложенной в разделе 3.2. Тело болта выполнено в виде балочного элемента диаметром 14 мм.

Между опорной площадкой и привалочной плоскостью колеса, а также между колесом и системой ударных элементов во время контакта учитывается наличие трения. Значение коэффициента трения в режиме статического нагружения принято равным  $\mu_{ст} = 0,2$ . При переходе нагружения в зону возникновения пластических деформаций, значение коэффициента трения от статического  $\mu_{ст}$  до динамического  $\mu_d$  изменяется по следующему закону (Hallquist, 2007: 1226–3006; Hallquist, 1998: 14–98; Mohan, 2010: 7–53):

$$\mu = \mu_d + (\mu_{ст} - \mu_d)e^{-cvv}, \quad (2)$$

где  $\mu_{ст}$  – статический коэффициент трения;

$\mu_d$  – динамический коэффициент трения;

$c$  – постоянная затухания;

$v$  – скорость узла второстепенного контактного тела относительно сегмента основного тела.

Первоначально груз расположен на высоте 207 мм над верхней точкой колеса, что соответствует расчетам согласно приведенной в ГОСТ (ГОСТ Р 52390-2005, 2007: 1–30) формуле:

$$H = K_p \cdot F_v, \quad (3)$$

$K_p$  – переходный коэффициент, равный 0,03 мм/Н для колес автомобилей категорий М1, О1, О2 и 0,04 мм/н для колес ТС других категорий;

$F_v$  – максимальная вертикальная статическая нагрузка на колесо, равная 690 кг для объекта исследования.

Для расчета на удар с имитацией виртуального ударного стенда использовался лицензионный комплекс КЭ анализа нелинейной динамики LS-Dyna. В качестве диаграмм деформирования использованы действительные характеристики материалов как элементов стенда, так и собственно колеса (Пономарев, 1958: 250–430). В расчетной модели учитываются демпфирующие свойства материалов, поскольку потери энергии удара на внутреннее трение в материалах колеса и ударной системы влияют на процесс затухания и логарифмический декремент затухания как величину, его характеризующую.

При ударном нагружении под влиянием скорости деформации изменяются форма и ключевые точки диаграммы деформирования, в т.ч. динамический предел текучести. Зависимость свойств материала описывается несколькими видами моделей упрочнения, такими как модели Джонсона-Кука, Купера-Саймондса, Церилли-Армстронга, Стейнберга Гуиана, и др. Анализ результатов, получаемых при использовании упомянутых моделей упрочнения, посвящено значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов, в том числе (Константинов, 2007: 5–142; Dietenberger, 2005: В–III–1–10). Выбор модели может зависеть от свойств материала (особенно, если между рассматриваемыми объектами они существенно различаются), и скорости деформаций. Рассматриваемые условия ударного нагружения колеса подразумевают значения скорости деформаций до  $10^2$

$c^{-1}$ . При подобных значениях различие для большинства рассматриваемых моделей не значительно. Поэтому, для оптимального соотношения точности расчета и доступности данных выбрано условие упрочнения Купера-Саймондса (Cowper, 1952: 1–46):

$$\frac{\sigma_{\text{дин}}}{\sigma_{\text{ст}}} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C}\right)^P, \quad (4)$$

где  $C, P$  - константы, определяемые экспериментальным путем;

- скорость деформации;

- предел текучести при статическом нагружении.

К каждому узлу расчетной схемы приложено поле ускорений свободного падения ( $9,81 \text{ м/с}^2$ ). Описание движения элементов модели выполнено в лагранжевой постановке. Решение системы уравнений динамики и уравнений состояния выполняется комплексом LS-Дуна с использованием метода явного интегрирования. В момент времени  $t = 0$  скорости и ускорения узлов модели  $\dot{x} = 0$  и  $\ddot{x} = 0$  и уравнение движения описывается формулой 5:

$$M \cdot \ddot{x}_t + C \cdot \dot{x}_t + K \cdot x_t = F, \quad (5)$$

где  $M$  – матрица масс;

$C$  – матрица вязкости;

$K$  – матрица жесткости;

$\ddot{x}_t, \dot{x}_t, x_t$  – матрицы ускорений, скоростей и перемещений соответственно в момент времени  $t$ .

Расчет выполнен для первых 2,0 с, где с шагом  $10^{-3}$  реализован цикл вычислительных операций, описанный в (Hiermaier, 2008: 100–380; Hallquist, 1998: 200–485]. На каждом шаге методом центральных разностей определяются кинематические параметры узлов: ускорения, скорости и перемещения. Для определения перемещений на шаге  $n+1$  используются скорости соответствующих узлов на половине шага  $n+1/2$  и осредненное приращение по времени от приращений на шагах  $n$  и  $n+1$ . На основании полученных значений вычисляется скорость деформации (формула 6) (Качанов, 1969: 115–289):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \dot{x}_l}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{x}_j}{\partial x_l} \right), \quad (6)$$

где  $\dot{x}_l, \dot{x}_j$  - компоненты вектора скорости;

$x_l, x_j$  - компоненты вектора перемещений.

Компоненты НДС определяются на основе значений скорости деформации в каждом узле с учетом уравнений сохранения массы, энергии, уравнений состояния и других уравнений механики сплошных сред, теории механических колебаний и теории удара.

Экспериментальное исследование НДС колеса под действием ударной нагрузки проводилось в МАДИ на стенде для сертификационных испытаний при ударе под  $30^\circ$ . В процессе исследований проводилось статическое (статическим приложением нагрузки ударника) и динамическое тензометрирование (Миронова, 2012: 5–130). Автор принимал участие в анализе результатов испытаний (Демьянушко, 2012: 42–49). Удар проводился в двух сечениях против спицы и между спицами по ободу колеса, при этом обработка результатов проведена для варианта нагружения «по спице».

Для анализа результатов расчета использованы максимальные значения деформаций, зафиксированные за время воспроизведения удара. На рисунке 3, б представлено распределение интенсивности деформаций в узлах КЭ модели колеса на внешней стороне колеса при ударе по ободу колеса напротив спицы.

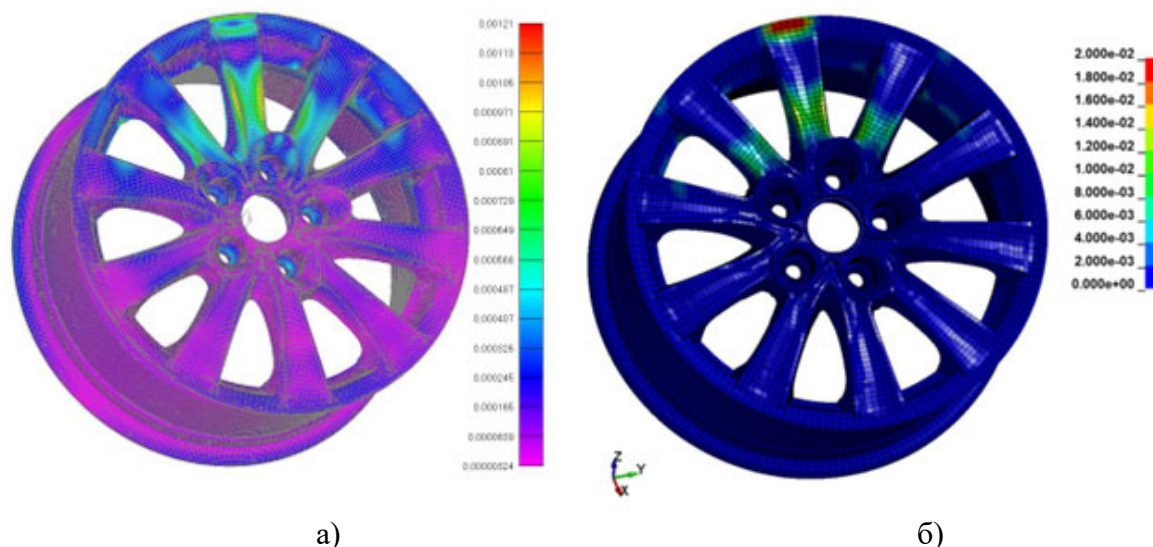


Рис. 3. Р аспределение интенсивности деформаций на внешней стороне колеса при расчете по схеме «Косой удар по спице» под углом  $30^\circ$ : статический (а) и динамический (б) расчеты.

Области возникновения максимальных деформаций идентичны тем, которые были получены во время расчета на статическое нагружение (рисунок 3, а) (Демьянушко, 2012: 42–49), и совпадают с зонами возникновения остаточных деформаций колеса, выявленными во время его осмотра после эксперимента.

Максимальное деформационное воздействие наблюдается в зоне непосредственного контакта бортовой закраины с ударным элементом. Остаточная пластическая деформация была зарегистрирована на колесе во время осмотра после проведения эксперимента. Ширина обода напротив спицы в зоне приложения нагрузки после эксперимента составила 193 мм (рисунок 4, а). Измерение выполнялось между крайними верхними точками обода. По результатам расчета ширина обода по измеряемым точкам составила 194,6 мм (рисунок 4, б и в).



а)

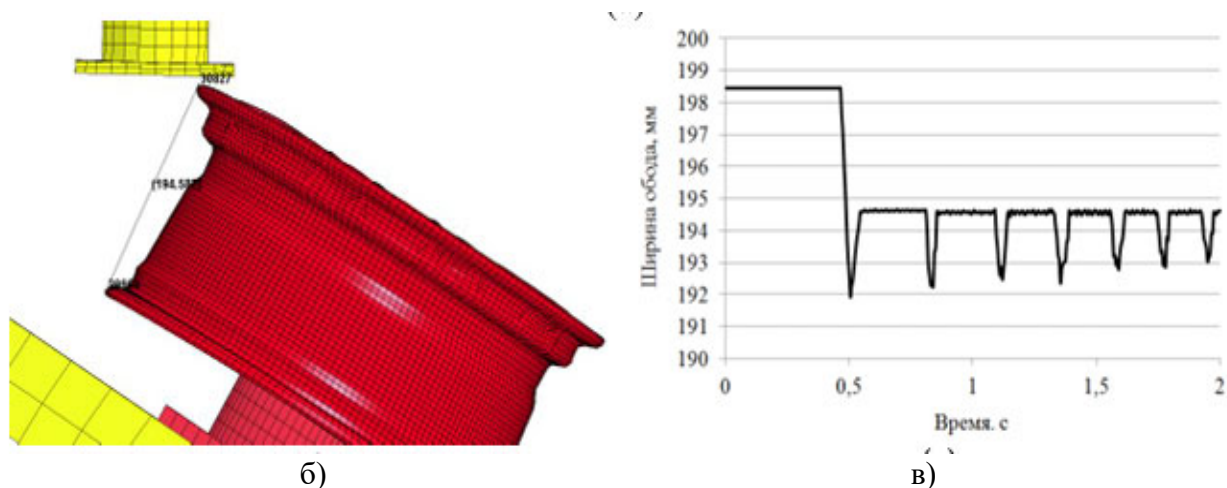


Рис. 4. Деформация обода колеса в зоне удара по итогам эксперимента (а) и в расчетной модели (б). Изменение ширины обода в течение первых 2,0 с

Помимо этого, наиболее нагруженной областью являются 3 спицы, ближайшие к ударному элементу, причем максимальную деформацию получает спица, расположенная напротив ударного груза. Деформации спицы в зоне, наиболее приближенной к ободу, незначительны по сравнению со значениями, зарегистрированными на ее противоположной части, ближайшей к ступице.

На внутренней стороне колеса максимальные деформации также распределены по трем спицам, ближайшим к ударному элементу (распределение приведено на рисунке 5). Деформации сжатия на внутренней стороне спиц в среднем примерно в полтора раза меньше деформаций растяжения на внешней стороне. Сравнение результатов расчета с данными эксперимента (таблица 1) показывают, что максимальное отклонение результатов расчета от данных эксперимента в среднем не превышают 11 % для большинства точек измерения.

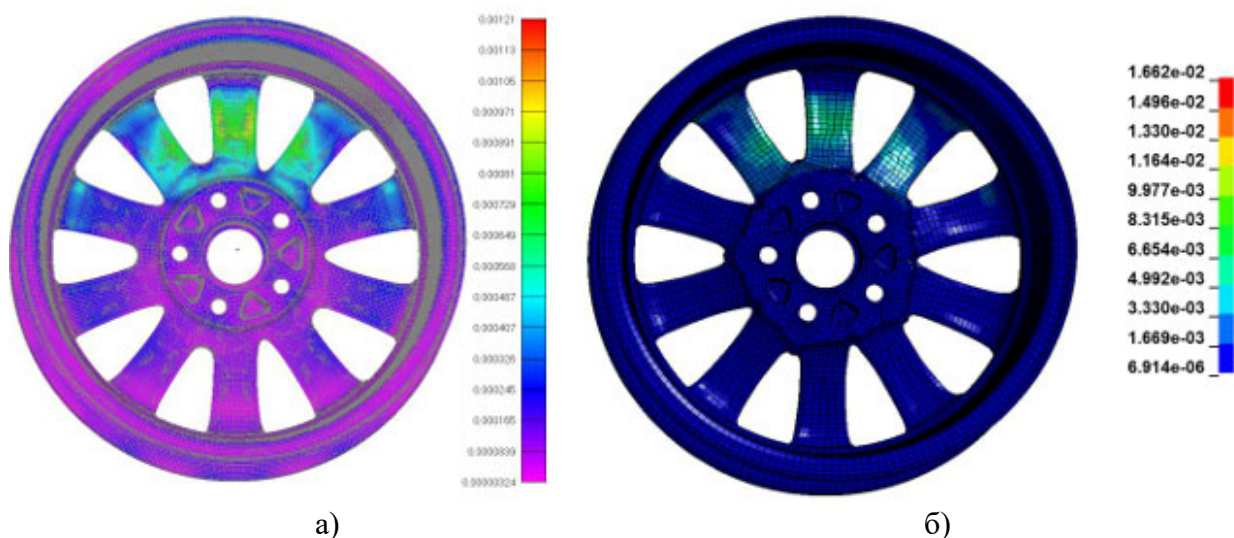


Рис. 5. Распределение деформаций на внутренней стороне колеса при расчете по схеме «Косой удар по спице» под углом 30°

Таблица 1 – Сопоставление результатов эксперимента с расчетными значениями при ударе напротив спицы

Тензо-резистор №	Экспериментальное значение деформации при ударе, $\epsilon_{\text{экс}}$ , %	Расчетное значение деформации при ударе $\epsilon_{\text{расч}}$ , %	Погрешность, %
1	0,3786	0,4478	18
3	0,3785	0,4274	13
4	0,3784	0,4203	11
5	0,3978	0,4232	6
6	0,3500	0,3875	11
13	0,1973	0,2167	10
14	0,1847	0,2003	8
16	0,3544	0,3848	9

Если рассматривать полученные результаты в сравнении с результатами расчета в условиях нагружения в статической постановке (Демьянушко, 2012: 42–49; 38]), то отношение деформации при ударе к деформации при статическом нагружении  $\epsilon_{\text{дин}} / \epsilon_{\text{ст}}$  находится в пределах от 9,26 до 11,69, причем среднее значение составляет  $\epsilon_{\text{дин}} / \epsilon_{\text{ст}} = 10,94$  при стандартном отклонении 0,82. Результаты сравнения приводятся в таблице 2.

Таким образом, результаты выполненного расчетного анализа подтверждают выводы, сформулированные в работе (Миронова, 2012: 5–130) о возможности использования среднего значения коэффициента динамичности для предварительной оценки сопротивления колеса удару для сравнительного вариантного анализа колес на этапе проектирования, что отражено в процессе (Репин, 2013: 215–300) анализа прочности колес, приведенном в Приложении 1 к данной работе.

Таблица 2 – Сопоставление результатов расчета в условиях статического и ударного нагружений

Тензо-резистор №	Расчетное значение деформации при статическом нагружении, $\epsilon_{\text{ст}}$ , %	Расчетное значение деформации при ударе $\epsilon_{\text{дин}}$ , %	$\epsilon_{\text{дин}} / \epsilon_{\text{ст}}$
1	0,0383	0,4478	18
3	0,0366	0,4274	13
4	0,0382	0,4203	11
5	0,0457	0,4232	6
6	0,0369	0,3875	11
13	0,0186	0,2167	10
14	0,0181	0,2003	8
16	0,0360	0,3848	9
Усредненное значение $\epsilon_{\text{дин}} / \epsilon_{\text{ст}}$			10,94

Проведен анализ волновых процессов, возникающих при ударе, для чего построен график зависимости деформаций в местах установки тензорезисторов от времени. Расчет выполнен для первых 2,0 с взаимодействия, что соответствует регистрации 7 пиков изменения НДС.

Полученные экспериментально (Миронова, 2012: 5–130) и нашим расчетом графики волновых процессов изменения деформаций в процессе удара представлены на рисунке 6, где сопоставлены значения деформации по трем датчикам (№ 5, 13 и 16), расположенным со стороны оси удара, по времени. Датчик № 5 размещен на спице, напротив которой приходится основное ударное воздействие, датчики № 13 и 16 - на ободе. Сравнение выполнено для всех определенных в работе (Миронова, 2012: 5–130) величин и сведено в таблицу 3.

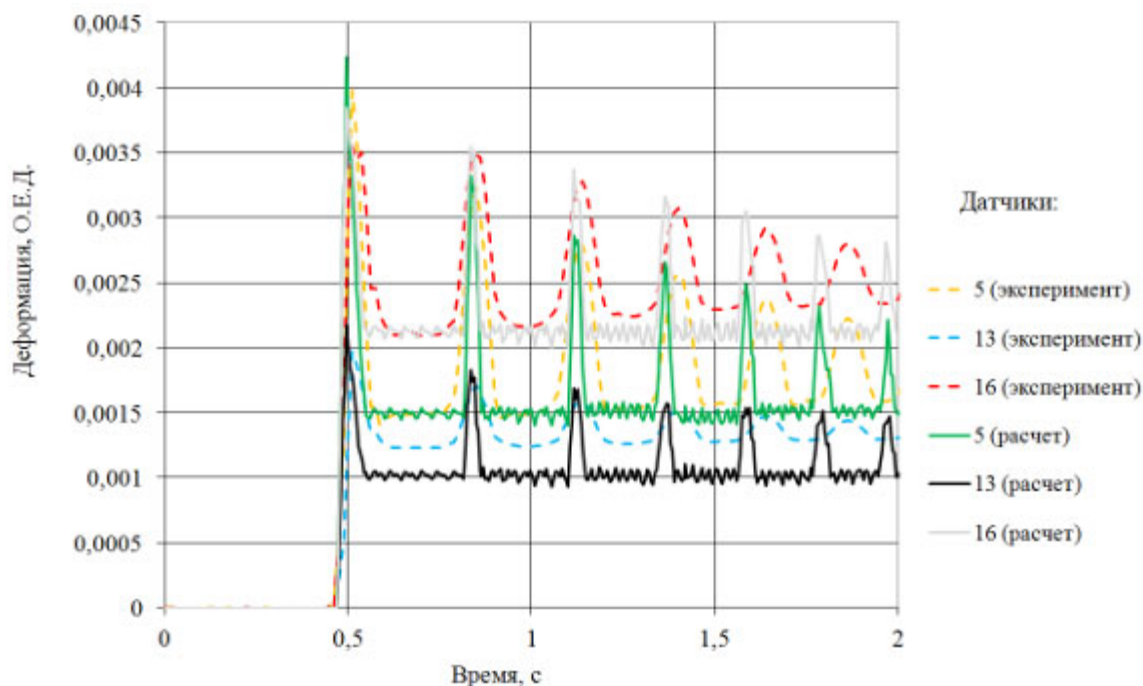


Рис. 6. Зависимость деформаций от времени при колеса по схеме «Косой удар по спице» под углом 30°

Таблица 3 – Сопоставление основных параметров колебательного процесса

Параметр	Расчетная величина	Экспериментальная величина	Погрешность, %
Период колебаний $T$ , с	0,246	0,260	5,4
Частота колебаний $\nu$ , рад <sup>-1</sup>	25,559	24,127	5,9
Логарифмический декремент затухания	$\approx 0,27$	$\approx 0,31$	$\approx 13\%$

Уже созданную расчетную схему достаточно легко трансформировать для определения НДС колеса при ударе между спицами. Для получения результата (значения деформации приведены в таблице 4) выполняется поворот колеса вокруг своей оси на 18°. Среднее значение коэффициента динамичности при подобном нагружении составило  $\epsilon_{\text{дин}} / \epsilon_{\text{ст}} = 10,76$  при стандартном отклонении 0,96.

Таблица 4 – Сопоставление результатов статического и динамического расчетов при нагружении между спицами

Тензо-резистор №	Расчет статический, $\epsilon_{\text{ст}}$ , %	Расчет при ударе $\epsilon_{\text{дин}}$ , %	$\epsilon_{\text{дин}} / \epsilon_{\text{ст}}$
1	0,0549	0,6071	11,06
3	0,0165	0,1827	11,07
4	0,0449	0,4386	9,77
5	0,0449	0,4078	9,08
6	0,0182	0,2231	12,26
13	0,0104	0,1167	11,22
14	0,0314	0,3376	10,75
16	0,0296	0,3217	10,87
Усредненное значение $\epsilon_{\text{дин}} / \epsilon_{\text{ст}}$			10,94

Проведенный анализ и сопоставление полученных результатов расчета с экспериментальными данными показали, что предложенная методика позволяет выполнить оценку несущей способности колеса при ударе.

Расчеты показали, что наиболее точные результаты расчета можно получить путем моделирования в расчетной схеме всех наиболее важных элементов испытательного стенда.

Испытательные стенды могут отличаться конструктивными и жесткостными параметрами, которые могут оказывать влияние на результат виртуальных и натурных испытаний. Для получения адекватных результатов стендовых испытаний колес на различных испытательных ударных стендах целесообразно дополнить ГОСТ 52390–2005 двумя дополнительными критериями.

К первому критерию относится расстояние между основным и дополнительным грузами. Согласно ГОСТ (ГОСТ Р 52390-2005, 2007: 1–30) регламентируется только суммарная жесткость пружин в кН/мм и предварительное сжатие в мм. Таким образом, поскольку расстояние между грузами не регламентировано, то сила сжатия может варьировать от стенда к стенду, что может вносить погрешность при сравнении результатов испытаний одного и того же изделия на двух стендах разной конструкции.

Второй параметр включает в себя контроль устойчивости опоры колеса и равномерность уровня пола под испытательным стендом. Наличие или отсутствие опоры колеса также способно оказать существенное влияние на ход испытаний и, как следствие, разницу полученных результатов в сопоставлении с расчетными данными. Испытательный стенд в сборе с колесом можно в строго упрощенной форме рассматривать как колебательную систему из двух тел, где опора колеса в сборе с элементами основания стенда в т.ч. выполняют функцию демпфера колебаний во время ударного взаимодействия.

Наличие ровной опоры обеспечивает в расчетной схеме возможность ограничить все степени свободы на поверхности контакта опоры стенда с напольным покрытием здания. Таким образом, в полном объеме обеспечивается условие заделки в фактических условиях испытаний. В случае наличия неровностей, особенно по границе опоры стенда, ее основание в момент удара также совершает вертикальные перемещения относительно горизонтальной плоскости. Таким образом, возникают перемещения самого колеса, изменяется форма колебаний опоры стенда, и показания тензодатчиков с большой вероятностью будут отличаться от результатов испытаний с корректной постановкой стенда.

### **Заключение**

Выполненное расчетно-экспериментальное исследование было направлено на решение актуальной научно-технической задачи — разработку и верификацию методики оценки прочности литых алюминиевых автомобильных колес при ударных нагрузках, моделирующих условия сертификационных испытаний. Поставленная цель исследования была реализована путем комплексного применения численных методов нелинейной динамики и сопоставления результатов расчетов с данными натурального эксперимента.

Для достижения цели исследования была сформирована последовательная методологическая схема, включающая анализ нормативных требований, построение конечно-элементной модели виртуального испытательного стенда, моделирование ударного взаимодействия колеса с нагружающей системой и экспериментальную проверку полученных результатов. Применение метода конечных элементов в лагранжевой постановке с использованием явного интегрирования позволило адекватно описать процесс ударного нагружения с учетом контактных взаимодействий, волновых процессов и скоростной чувствительности материалов.

В рамках исследования были реализованы все заявленные методы и этапы. Разработанная расчетная модель включала основные элементы сертификационного испытательного стенда, что обеспечило корректное воспроизведение условий эксперимента. В качестве материала исследования было выбрано литое алюминиевое колесо типоразмера 7Jx16", обладающее репрезентативной геометрией и достаточным объемом экспериментальных данных, полученных ранее в условиях натурных испытаний. Количественные характеристики материала, геометрии и нагружающей системы заданы в

соответствии с нормативными и экспериментальными данными, что повышает достоверность полученных результатов.

В результате проведенного расчетного анализа получены пространственно-временные распределения деформаций и напряжений в конструкции колеса при косом ударе под углом  $30^\circ$ . Установлено, что зоны максимальных деформаций локализуются в области контакта бортовой закраины с ударным элементом, а также в спицах, расположенных вблизи оси удара. Эти зоны полностью совпадают с областями остаточных пластических деформаций, выявленных при экспериментальном осмотре колеса после испытаний, что подтверждает корректность расчетной модели.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных тензометрических измерений показало, что расхождение между расчетными и экспериментальными значениями деформаций в большинстве контрольных точек не превышает 10–11 %, что соответствует инженерно допустимому уровню погрешности для задач нелинейной динамики и удара. Анализ колебательных процессов позволил установить хорошее согласование расчетных и экспериментальных значений периода, частоты и логарифмического декремента затухания, что свидетельствует об адекватном учете демпфирующих свойств системы «колесо – испытательный стенд».

В ходе исследования подтверждена выдвинутая гипотеза о том, что детализированное численное моделирование ударных испытаний колес с учетом конструктивных особенностей испытательного стенда и реальных диаграмм деформирования материалов позволяет получить результаты, сопоставимые с экспериментальными без привлечения эмпирических поправочных коэффициентов. При этом установлено, что коэффициент динамичности, используемый в инженерной практике, может применяться для предварительной оценки сопротивления колес удару на ранних стадиях проектирования, однако его использование должно быть обосновано результатами расчетного анализа.

Полученные результаты позволили уточнить влияние параметров испытательного стенда на процесс ударного нагружения. Показано, что такие факторы, как расстояние между грузами нагружающей системы, жесткость пружин и устойчивость опоры стенда, оказывают существенное влияние на характер колебаний и уровень деформаций колеса. В связи с этим обоснована целесообразность дополнения действующих нормативных документов дополнительными требованиями к конструкции и установке испытательных стендов с целью повышения сопоставимости результатов сертификационных испытаний.

Основные выводы исследования заключаются в следующем:

- разработанная расчетно-экспериментальная методика обеспечивает достоверную оценку напряженно-деформированного состояния автомобильных колес при ударных нагрузках;

- численное моделирование ударных испытаний с учетом элементов стенда позволяет воспроизводить реальные условия эксперимента и получать результаты, согласующиеся с натурными данными;

- использование коэффициента динамичности допустимо для предварительного вариантного анализа, однако для окончательной оценки прочности предпочтительно применять прямое моделирование ударного процесса;

- учет конструктивных и жесткостных характеристик испытательного стенда является необходимым условием получения адекватных расчетных результатов.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования разработанной методики при проектировании и доводке автомобильных колес, а также при подготовке к сертификационным испытаниям. Результаты исследования могут быть использованы в инженерной практике для снижения объема дорогостоящих натурных экспериментов и повышения надежности конструктивных решений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением разработанной методики на другие типы колес, учет влияния шины при различных углах удара, а также с исследованием влияния неоднородности материала и технологических дефектов литья на сопротивление колес ударным нагрузкам. Дополнительным направлением является совершенствование нормативной базы сертификационных испытаний с учетом выявленных факторов, влияющих на воспроизводимость и достоверность результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

ГОСТ Р 52390-2005, 2007 — ГОСТ Р 52390-2005. Транспортные средства. Колеса дисковые. Технические требования и методы испытаний = Road vehicles. Disc wheels. Technical requirements and tests methods: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 ноября 2005 года № 280-ст: дата введения 2007-01-01 / разработан Всероссийским научно-исследовательским институтом стандартизации и сертификации в машиностроении (ВНИИНМАШ). — Москва: Госстандарт. — 2007. — 30 с. [Russ.]

Демьянушко, 2012 — Демьянушко И.В., Миронова В.В., Логинов Е.М. Исследование напряженно-деформированного состояния литых автомобильных колес при ударных нагрузках // Машиностроение и инженерное образование. — МГИУ. — 2012. — № 1(30). — С. 42–49. [Russ.]

Миронова, 2012 — Миронова В.В. Исследования напряженно-деформированного состояния литых алюминиевых автомобильных колес при ударных нагрузках: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06; [место защиты: Моск. гос. индустр. ун-т]. — Москва. — 2012. — 132 с. [Russ.]

Hallquist, 2007 — Hallquist J.O. LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume 1. Version 971. — Livermore Software Technology Corporation. — Livermore, California. — 2007. — 2206 p. [Eng.]

Hallquist, 1998 — Hallquist J.O. LS-DYNA theoretical manual. — Livermore Software Technology Corporation. — Livermore, California. — 1998. — 498 p. [Eng.]

Mohan, 2010 — Mohan P., Park C-K., Marzougui D., Kan C-D., Guha S., Maurath C., Bhalsod D. LSTC/NCAC Dummy Model Development // 11th International LS DYNA User Conference. — Dearborn (Michigan). — 2010. — P. 7–53, P. 7–64. [Eng.]

Пономарев, 1958 — Пономарев С.Д., Бидерман В.Л., Лихарев К.К. и др. Расчеты на прочность в машиностроении. Т.2: Некоторые задачи прикладной теории упругости. Расчеты за пределами упругости. Расчеты на ползучесть. — Москва: Машгиз. — 1958. — 974 с. [Russ.]

Константинов, 2007 — Константинов А.Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.06; [место защиты: Нижегород. гос. ун-т им. Н.И. Лобачевского]. — Нижний Новгород. — 2007. — 144 с. [Russ.]

Dietenberger, 2005 — Dietenberger M., Buyuk M., Kan C-D. Dietenberger M. Development of a High Strain-Rate Dependent Vehicle Model // 4th German LS-DYNA Forum. — Bamberg (Germany). — 2005. — P. B-III-1–10. [Eng.]

Cowper, 1952 — Cowper G.R., Symonds P.S. Strain hardening and strain rate effects in the impact loading of cantilever beams // Brown Univ., Div. of Appl. Mech. — 1952. — Report № 28. — 46 p. [Eng.]

Hiermaier, 2008 — Hiermaier S. Structures under crash and impact - Continuum Mechanics, Discretization and Experimental Characterization. — 1st ed. — New York: Springer Science + Business Media LLC. — 2008. — XII. — 410 p. [Eng.]

Качанов, 1969 — Качанов Л.М. Основы теории пластичности. — Москва: Наука. — 1969. — 420 с. [Russ.]

Репин, 2013 — Репин В.В., Елиферов В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес процессов. — Москва: Манн, Иванов и Фербер. — 2013. — 543 с. [Russ.]

#### REFERENCES

GOST R 52390-2005, 2007 — GOST R 52390-2005 (2007). Transportnye sredstva. Kolesa diskovye. Tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy = Road vehicles. Disc wheels. Technical requirements and test methods: natsional'nyi standart Rossiiskoi Federatsii: ofitsial'noe izdanie: utverzhden i vveden v deistvie prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 7 noyabrya 2005 goda No. 280-st; data vvedeniya 2007-01-01 / razrabotan Vserossiiskim nauchno-issledovatel'skim institutom standartizatsii i sertifikatsii v mashinostroenii (VNIINMASH). — Moscow: Gosstandart. — 2007. — 30 p. [in Russ.]

Dem'yanushko, 2012 — Dem'yanushko, I.V., Mironova, V.V., Loginov, E.M. (2012). Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya litykh avtomobil'nykh koles pri udarnykh nagruzkakh [Investigation of the stress-strain state of cast automobile wheels under impact loads]. Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie. — MGIU. — 2012. — No. 1(30). — Pp. 42–49. [in Russ.]

Mironova, 2012 — Mironova, V.V. (2012). Issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya litykh alyuminiyevykh avtomobil'nykh koles pri udarnykh nagruzkakh: Cand. tech. sci. diss.: 01.02.06; [Moscow State Industrial University]. — Moscow. — 2012. — 132 p. [in Russ.]

Hallquist, 2007 — Hallquist, J.O. (2007). LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. 1. Version 971. — Livermore Software Technology Corporation. — Livermore, California. — 2007. — 2206 p.

Hallquist, 1998 — Hallquist, J.O. (1998). LS-DYNA Theoretical Manual. — Livermore Software Technology Corporation. — Livermore, California. — 1998. — 498 p.

Mohan, 2010 — Mohan, P., Park, C.-K., Marzougui, D., Kan, C.-D., Guha, S., Maurath, C., Bhalsod, D. (2010). LSTC/NCAC Dummy Model Development. 11th International LS-DYNA User Conference. — Dearborn, Michigan. — 2010. — Pp. 7–53; 7–64.

Ponomarev, 1958 — Ponomarev, S.D., Biderman, V.L., Likharev, K.K., et al. (1958). Raschety na prochnost' v mashinostroenii. Vol. 2: Nekotorye zadachi prikladnoi teorii uprugosti. Raschety za predelami uprugosti. Raschety na polzuchest'. — Moscow: Mashgiz. — 1958. — 974 p. [in Russ.]

Konstantinov, 2007 — Konstantinov, A.Yu. (2007). Eksperimental'no-raschetnoe issledovanie povedeniya konstruktsionnykh materialov pod deistviem dinamicheskikh nagruzok: Cand. tech. sci. diss.: 01.02.06; [Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod]. — Nizhny Novgorod. — 2007. — 144 p. [in Russ.]

Dietenberger, 2005 — Dietenberger, M., Buyuk, M., Kan, C.-D. (2005). Development of a High Strain-Rate Dependent Vehicle Model. 4th German LS-DYNA Forum. — Bamberg, Germany. — 2005. — Pp. B-III-1-10.

Cowper, 1952 — Cowper, G.R., Symonds, P.S. (1952). Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams. — Brown University, Division of Applied Mechanics. — 1952. — Report No. 28. — 46 p.

Hiermaier, 2008 — Hiermaier, S. (2008). Structures under Crash and Impact: Continuum Mechanics, Discretization and Experimental Characterization. — 1st ed. — New York: Springer Science + Business Media LLC. — 2008. — XII, 410 p.

Kachanov, 1969 — Kachanov, L.M. (1969). Osnovy teorii plastichnosti [Fundamentals of plasticity theory]. — Moscow: Nauka. — 1969. — 420 p. [in Russ.]

Repin, 2013 — Repin, V.V., Eliferov, V. (2013). Protsessnyi podkhod k upravleniyu. Modelirovanie biznes-protsessov [Process approach to management. Business process modeling]. — Moscow: Mann, Ivanov i Ferber. — 2013. — 543 p. [in Russ.]

ISSN 1814-5787 (print)  
ISSN 3006-0273 (online)  
Vol. 21. Is. 4. Number 84 (2024). Pp. 108–121  
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>  
<https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.008>  
UDC 656.2

## METHODS AND ALGORITHMS FOR TRAINING NEURAL NETWORKS BASED ON EXPERT KNOWLEDGE FOR EMERGENCY MANAGEMENT IN RAILWAY TRANSPORT

*V.M. Ushurov*

International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan.  
E-mail: [ushurov.valedin@mtgu.edu.kz](mailto:ushurov.valedin@mtgu.edu.kz)

**Valedin Ushurov** — master student, International University of Transport and Humanities, Almaty, Kazakhstan  
E-mail: [ushurov.valedin@mtgu.edu.kz](mailto:ushurov.valedin@mtgu.edu.kz), <https://orcid.org/0009-0008-8893-5690>.

© V.M. Ushurov

**Abstract.** In the context of increasing complexity and digitalization of decision-making processes, there is a growing demand for intelligent decision support systems capable of operating effectively in weakly formalized domains. Such domains are typically characterized by insufficient observational data, high uncertainty, and a significant role of expert knowledge. Under these conditions, traditional neural network training methods demonstrate limited applicability, which necessitates the development of alternative approaches focused on integrating expert experience into the learning process. The objective of this study is to develop a method for training artificial neural networks based on expert knowledge that enables the formation of a training dataset in the absence of sufficient statistical observations. To achieve this objective, existing approaches to neural network training were analyzed, and algorithms for generating training stimulus–response pairs, processing training data, and training neural networks using visual representations of situations were developed. The results of the study include the proposed expert-based neural network training method and a set of algorithms for data generation and preprocessing. It is demonstrated that a neural network trained using the proposed approach accumulates both formalized and implicit components of expert knowledge and can be applied in both “black-box” and “gray-box” modes, including knowledge extraction. In conclusion, the validity of the research hypothesis is confirmed, showing that effective neural network training in data-scarce environments is achievable through expert knowledge integration. The practical applicability of the proposed method in intelligent decision support systems is substantiated, and directions for further research are outlined.

**Keywords:** artificial neural network, expert knowledge, weakly formalized domains, neural network training, visual representations, decision support systems.

**For citation:** V.M. Ushurov. Methods and Algorithms for Training Neural Networks Based on Expert Knowledge for Emergency Management in Railway Transport//Industrial Transport of Kazakhstan. 2024. Vol. 21. No. 84. Pp. 108–121. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.008>.

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

ТЕМІРЖОЛДАҒЫ ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙЛАРДЫ БАСҚАРУ ҮШІН САРАПШЫ  
БІЛІМДЕРІНЕ НЕГІЗДЕЛГЕН НЕЙРОЖЕЛІДІ ОҚЫТУ ӘДІСТЕРІ МЕН  
АЛГОРИТМДЕРІ

**В.М. Ушуров**

Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан.

E-mail: ushurov.valedin@mtgu.edu.kz

**Валедин Ушуров** — магистрант, Халықаралық көліктік-гуманитарлық университеті, Алматы, Қазақстан

E-mail: ushurov.valedin@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-8893-5690>.

© В.М. Ушуров

**Аннотация.** Қазіргі кезеңде басқару процестерінің күрделенуі мен цифрландырудың дамуы әлсіз формалданатын пәндік салаларда тиімді жұмыс істей алатын интеллектуалдық шешім қабылдауды қолдау жүйелеріне деген қажеттілікті арттыруда. Мұндай салаларда деректердің жеткіліксіздігі, белгісіздіктің жоғары деңгейі және сарапшының кәсіби тәжірибесінің шешуші рөлі байқалады. Осы жағдайларда жасанды нейрондық желілерді оқытудың дәстүрлі әдістері шектеулі мүмкіндіктерге ие болып, сараптамалық білімге негізделген жаңа тәсілдерді әзірлеуді талап етеді. Зерттеудің мақсаты — статистикалық бақылаулардың жеткіліксіздігі жағдайында сарапшы білімін пайдалана отырып, жасанды нейрондық желіні оқыту әдісін әзірлеу. Аталған мақсатқа жету үшін ИНС оқытудың қолданыстағы тәсілдеріне талдау жүргізілді, «ынталандыру–реакция» түріндегі оқыту жұптарын қалыптастыру алгоритмдері, деректерді өңдеу және визуалды бейнелерді қолдану арқылы нейрондық желіні оқыту әдістері әзірленді. Зерттеу нәтижелері ретінде сарапшының визуалды түрде ұсынылған жағдайларды жіктеуіне негізделген ИНС оқытудың жаңа әдісі ұсынылды. Ұсынылған тәсіл нейрондық желіде сарапшының формалданатын және формалданбайтын (санадан тыс) білімдерін жинақтауға мүмкіндік беретіні көрсетілді. Қорытындыда зерттеу гипотезасының дұрыстығы дәлелденіп, алынған нәтижелердің интеллектуалдық шешім қабылдауды қолдау жүйелерінде практикалық қолдану мүмкіндіктері мен одан әрі зерттеу бағыттары айқындалды.

**Түйін сөздер:** жасанды нейрондық желі, сараптамалық білім, әлсіз формалданатын салалар, ИНС оқыту, визуалды бейнелер, шешім қабылдауды қолдау

**Дәйексөздер үшін:** В.М. Ушуров. Теміржолдағы төтенше жағдайларды басқару үшін сарапшы білімдеріне негізделген нейрожелілі оқыту әдістері мен алгоритмдері//Қазақстан өндіріс көлігі. 2024. Том. 21. № 84. 108–121 бет. (Орыс. тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.008>.

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

## МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ЗНАНИЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЧС НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

**В.М. Ушуров**

Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан.

E-mail: ushurov.valedin@mtgu.edu.kz

**Валедин Ушуров** — магистрант, Международный транспортно-гуманитарный университет, Алматы, Казахстан

E-mail: ushurov.valedin@mtgu.edu.kz, <https://orcid.org/0009-0008-8893-5690>.

© В.М. Ушуров



**Аннотация.** В условиях цифровизации и усложнения процессов управления возрастает потребность в интеллектуальных системах поддержки принятия решений, способных эффективно функционировать в слабо формализуемых предметных областях. Особую актуальность данная проблема приобретает в ситуациях, характеризующихся дефицитом наблюдаемых данных, высокой неопределённостью и значительной ролью человеческого фактора. В таких условиях традиционные методы обучения искусственных нейронных сетей оказываются ограниченно применимыми, что требует разработки новых подходов, ориентированных на использование экспертных знаний. Целью исследования является разработка метода обучения искусственной нейронной сети на основе знаний эксперта, обеспечивающего формирование обучающей выборки в условиях отсутствия достаточного массива статистических наблюдений. Для достижения поставленной цели в работе решены задачи анализа существующих подходов к обучению ИНС, разработки алгоритмов формирования массива обучающих пар «стимул–реакция», обработки обучающих данных и обучения нейросетевой модели с использованием визуальных образов ситуаций. Результаты исследования заключаются в разработке оригинального метода обучения ИНС, основанного на экспертной классификации визуально представленных ситуаций, а также в создании алгоритмов генерации, обработки и использования обучающей выборки. Показано, что обученная таким образом ИНС аккумулирует как формализуемые, так и подсознательные компоненты экспертного знания и может использоваться в режимах «чёрного» и «серого» ящика. В заключении обоснована истинность выдвинутой гипотезы о возможности эффективного обучения ИНС в условиях дефицита данных за счёт интеграции экспертных знаний. Определены перспективы практического применения разработанного метода в интеллектуальных системах поддержки принятия решений и направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, экспертные знания, слабо формализуемые области, обучение ИНС, визуальные образы, поддержка принятия решений

**Для цитирования:** В.М. Ушуров. Методы и алгоритмы обучения нейросети на основе экспертных знаний для управления ЧС на железной дороге//Помышленный транспорт Казахстана. 2024. Т. 21. No. 84. Стр. 108–121. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2024.84.04.008>.

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Введение

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса к применению интеллектуальных систем поддержки принятия решений (СППР) в сложных технико-организационных системах, функционирующих в условиях неопределённости, неполноты и противоречивости исходной информации. Особенно остро данная проблема проявляется в слабо формализуемых предметных областях, где принятие решений в значительной степени опирается на профессиональный опыт, интуицию и подсознательные знания экспертов, а формирование репрезентативных обучающих выборок на основе статистических наблюдений затруднено или невозможно (Bartlett, 1998: 525–536; Koltchinskii, 2002: 1–50).

Искусственные нейронные сети (ИНС) зарекомендовали себя как эффективный инструмент аппроксимации сложных нелинейных зависимостей и классификации ситуаций. Однако классические методы обучения ИНС предполагают наличие достаточного объёма размеченных данных, что существенно ограничивает их применение в задачах, связанных с редкими, уникальными или экстремальными ситуациями, включая задачи управления и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на объектах критической инфраструктуры. В подобных условиях возникает проблемная ситуация, заключающаяся в противоречии между высокой потребностью в интеллектуальной

поддержке решений и отсутствием необходимого массива наблюдений для обучения ИНС.

Одним из возможных путей разрешения данной проблемы является привлечение знаний компетентных экспертов к процессу обучения ИНС. В ряде исследований показано, что знания, извлекаемые из обученных нейронных сетей, могут быть интерпретированы в виде правил, решающих границ и других форм представления, что позволяет рассматривать ИНС не только как вычислительный инструмент, но и как носитель экспертных знаний (Craven, 1996: 24–30; Duch, 2001: 277–306; Andrews и др., 1995: 373–389). Вместе с тем существующие подходы в основном ориентированы на последующее извлечение знаний из уже обученной ИНС, а не на формирование обучающей выборки непосредственно на основе экспертных решений.

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки методов обучения ИНС, обеспечивающих возможность их применения в условиях дефицита обучающих данных и высокой роли человеческого фактора. Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов интеллектуализации СППР за счёт интеграции экспертных знаний и нейросетевых технологий. Практическая значимость обусловлена возможностью использования разработанного метода при создании и адаптации интеллектуальных систем для конкретных объектов и условий эксплуатации, в том числе в области транспортной инфраструктуры.

Объектом исследования являются процессы интеллектуальной поддержки принятия решений в слабо формализуемых предметных областях. Предметом исследования является метод обучения искусственной нейронной сети на основе знаний эксперта с использованием визуальных образов ситуаций.

Цель исследования заключается в разработке и обосновании метода обучения ИНС, позволяющего формировать обучающую выборку на основе экспертных знаний в условиях отсутствия достаточного объёма наблюдаемых данных.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- анализ существующих методов обучения ИНС и подходов к извлечению и формализации экспертных знаний;
- разработка метода формирования массива обучающих пар «стимул–реакция» на основе экспертных решений;
- разработка алгоритмов обработки обучающей выборки и обучения ИНС;
- обоснование возможности использования визуальных образов для повышения качества экспертной классификации ситуаций;
- анализ вариантов использования обученной ИНС в режимах «чёрного» и «серого» ящика.

В качестве методов исследования используются методы теории искусственных нейронных сетей, статистического обучения, когнитивной визуализации данных, экспертных оценок и алгоритмического моделирования.

Гипотеза исследования состоит в предположении, что обучение ИНС на основе экспертных решений, полученных при классификации визуально представленных ситуаций, позволяет сформировать модель, адекватно отражающую ментальную модель эксперта и обеспечивающую требуемое качество классификации даже при отсутствии достаточного массива статистических данных.

Результаты исследования могут быть использованы при проектировании и интеллектуализации СППР в различных отраслях народного хозяйства, а также при дальнейшем развитии методов извлечения и формализации экспертных знаний на основе обученных нейросетевых моделей.

### **Материалы и методы**

Настоящее исследование направлено на решение научной проблемы обучения искусственных нейронных сетей в условиях дефицита обучающих данных и высокой

степени слабоформализуемости предметной области. В рамках работы были поставлены следующие исследовательские вопросы:

- возможно ли обеспечить обучение ИНС при отсутствии репрезентативного массива наблюдений за счёт использования экспертных знаний;
- каким образом можно формализовать как осознаваемые, так и подсознательные компоненты экспертного знания;
- повышает ли использование визуальных образов качество экспертной классификации ситуаций и, как следствие, качество обучения ИНС.

Гипотеза исследования состоит в том, что формирование обучающей выборки ИНС на основе экспертных решений, полученных при классификации визуально представленных ситуаций, позволяет создать нейросетевую модель, адекватно отражающую ментальную модель эксперта и обеспечивающую требуемое качество классификации в слабо формализуемых предметных областях.

В качестве материала исследования использовались:

- экспертные знания специалистов, обладающих практическим опытом принятия решений в рассматриваемой предметной области;
- искусственно сформированные обучающие векторы входных сигналов ИНС, принадлежащие заданной области признакового пространства;
- визуальные образы ситуаций, синтезированные компьютерными средствами на основе сгенерированных входных векторов.

Материал исследования носит смешанный характер:

- в качественном отношении он представлен экспертными классификационными решениями, отражающими профессиональный опыт, интуицию и подсознательные знания эксперта;
- в количественном отношении — массивом обучающих пар вида  $\langle u(n), d_j(n) \rangle$ , где  $u(n)$  — входной вектор ИНС, а  $d_j(n)$  — эталонный сигнал, соответствующий одному из  $S$  классов ситуаций.

Объём обучающего массива определяется числом свободных параметров ИНС и допустимой ошибкой классификации, что обеспечивает воспроизводимость и обоснованность результатов. Использование материала такого типа позволяет моделировать реальные условия профессиональной деятельности эксперта и повышает достоверность полученных выводов.

Исследование проводилось последовательно и включало следующие этапы:

Аналитический этап, на котором выполнен анализ существующих методов обучения ИНС и подходов к извлечению экспертных знаний, а также выявлены их ограничения при работе в условиях дефицита данных (Bartlett, 2002: 463–482; Koltchinskii, 2002: 1–50).

Методологический этап, включающий разработку метода формирования обучающей выборки на основе экспертных знаний и формализацию процедуры взаимодействия эксперта с системой.

Алгоритмический этап, на котором разработаны алгоритмы генерации обучающих векторов, синтеза визуальных образов, обработки массива обучающих пар и обучения ИНС.

Экспериментально-модельный этап, включающий формирование обучающего массива, обучение ИНС и анализ полученных результатов.

Интерпретационный этап, на котором рассмотрены варианты использования обученной ИНС в режимах «чёрного» и «серого» ящика, а также возможности извлечения знаний из обученной модели.

Для решения поставленных задач в работе использовалась совокупность взаимодополняющих методов:

- методы теории искусственных нейронных сетей и статистического обучения, применяемые для построения и обучения классификационных моделей;

– методы экспертных оценок, используемые для формирования эталонных решений в условиях отсутствия наблюдаемых данных;

– методы когнитивной визуализации многомерных данных, включая пиктографическое представление информации, обеспечивающее интеграцию большого числа параметров в единый визуальный образ;

– алгоритмические методы генерации псевдослучайных векторов и обработки данных;

– методы анализа и интерпретации нейросетевых моделей, направленные на извлечение знаний из обученной ИНС.

Новизна используемой методологии заключается в совместном применении генерации обучающих данных, визуального представления ситуаций и экспертной классификации как единого процесса формирования обучающей выборки. В отличие от традиционных подходов, ориентированных на последующее извлечение знаний из обученной ИНС, в данной работе экспертное знание непосредственно интегрируется в процесс обучения, что обеспечивает перенос как формализуемых, так и подсознательных компонентов профессионального опыта в параметры нейросетевой модели.

### **Результаты и обсуждение**

В статье представлен разработанный автором метод обучения ИНС (искусственная нейронная сеть), позволяющий производить обучение ИНС на основе знаний эксперта, в том числе и в слабо формализуемых предметных областях, и его алгоритмы.

Описываемый метод обучения ИНС позволяет применять технологию ИНС в случае отсутствия достаточного для ее обучения ряда наблюдений исследуемых ситуаций, за счет использования знаний компетентного в рассматриваемой области эксперта (Craven, 1996: 24–30).

Метод относится к группе методов, в которых для формирования обучающей выборки эксперт последовательно делает заключения относительно предъявляемых ему описаний ситуаций из рассматриваемой предметной области.

Такие знания можно выявить только в ходе практических операций эксперта (например, в процессе принятия решений). В предлагаемом методе эксперт последовательно определяет классы исследуемых ситуаций, к которым относятся сгенерированные с помощью генератора псевдослучайных чисел обучающие векторы входных сигналов ИНС, принадлежащие рассматриваемой области, и созданные компьютерными средствами визуальные образы, наглядно описывающие ситуации, задаваемые сгенерированными обучающими векторами. Результаты работы эксперта записывают на носитель информации в виде пар «стимул-реакция» и используют для обучения ИНС (Duch, 2001: 277–306).

Выявление знаний таким способом наиболее близко к реальной профессиональной деятельности эксперта, поэтому полученные результаты содержат, в том числе, и подсознательный слой экспертного знания, который может быть в дальнейшем исследован и формализован.

Создание компьютерными средствами визуальных образов ситуаций, задаваемых генерируемыми обучающими векторами, облегчает работу эксперта по распознаванию предлагаемых ему ситуаций в смысле отнесения их к одному из возможных классов. Создаваемые образы, по возможности, должны максимально соответствовать параметрам ситуаций, которые эксперт наблюдает в своей реальной профессиональной деятельности. Визуальный образ дает возможность интегрирования большого количества параметров ситуации в единый образ с его однозначной классификацией экспертом.

В системах когнитивной графики (Chernoff, 1973: 361–368), например в системе КОГРА (когнитивная система для графической интерпретации данных и представления ситуаций) такие образы ситуаций называют «когнитивными» (лат. *cognitio* – познание).

Поскольку этот термин заимствован из области психологии, где имеет собственное значение, то в диссертации целесообразно в дальнейшем использовать нейтральное понятие «визуальный образ».

В качестве визуального образа могут быть представлены показания соответствующих приборов и информационных табло, изображения, созданные при помощи средств компьютерной графики, диаграммы, технические мнемосхемы и т.д. Также могут использоваться и пиктографики «лиц Чернова» (англ. *Chernoff faces*), позволяющие эффективно визуализировать многомерные данные в виде изображений человеческих лиц и их отдельных частей, что позволяет оценивать большое количество данных (Горохов, 2018: 5–10). Выбор представления визуального образа определяется особенностями деятельности эксперта.

Разработанный метод предъявления ситуаций эксперту и считывания его решений обеспечивает формирование достаточного числа обучающих пар.

Общая схема предлагаемого метода включает в себя следующие этапы:

- этап формирования массива обучающих пар «стимул-реакция» на основе знаний эксперта;
- этап обработки полученного массива обучающих пар;
- этап собственно обучения ИНС.

Алгоритм этапа формирования массива обучающих пар «стимул-реакция» на основе знаний эксперта содержит следующие шаги:

1. Определение необходимого числа  $K$  обучающих векторов  $u(n)$ ,  $n=1, 2, \dots, K$  для обучения ИНС, т.е. числа точек на  $N$ -мерном пространстве входных векторов  $u$ ;

2. Указание диапазона изменения входных сигналов ИНС, т.е. ограничение всего  $N$ -мерного пространства входных векторов  $u$  некоторой рассматриваемой областью  $O$  (на Рис. 1 показана штриховкой для случая, когда  $N=2$ );

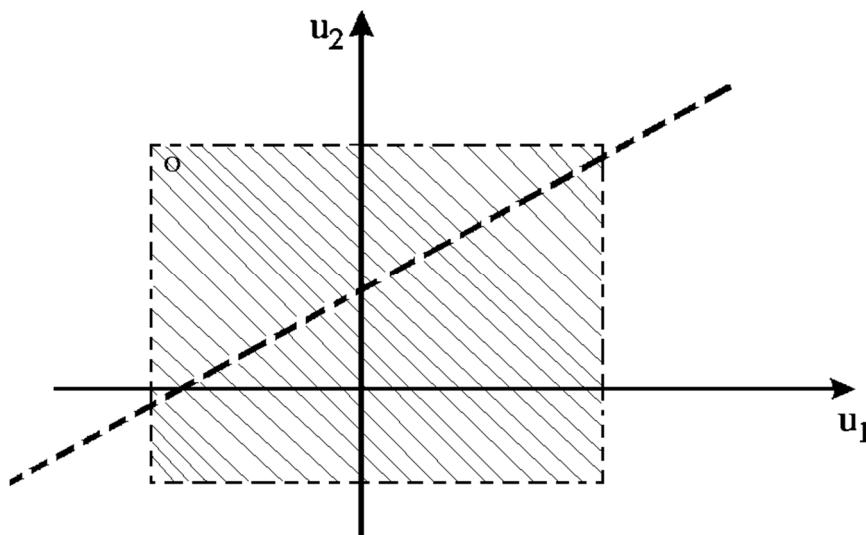


Рис. 1. Ограничение двумерного пространства входных векторов  $u$  рассматриваемой областью  $O$

1. Указание экспертом  $S$  векторов, описывающих наиболее типичных представителей каждого из  $S$  исследуемых классов ситуаций  $L_1, L_2, \dots, L_j (j = 1, 2, \dots, S)$ , принадлежащих области  $O$ ;
2. Генерация с помощью генератора псевдослучайных чисел  $K$  обучающих векторов  $u(n)$ ,  $n = 1, 2, \dots, K$  входных сигналов ИНС, принадлежащих области  $O$ , вначале

вблизи окрестности точек, указанных экспертом на шаге 3 алгоритма, т.е. вблизи окрестности точек  $S$  векторов, описывающих наиболее типичных представителей каждого из  $S$  исследуемых классов  $L_1, L_2, \dots, L_j$ , с последующим последовательным равномерным расширением этой окрестности с шагом  $Shag$  до указанной ранее области  $O$ ;

3. Создание компьютерными средствами визуальных образов, наглядно описывающих ситуации, задаваемые сгенерированными обучающими векторами  $u(n)$ ;

4. Демонстрация эксперту сгенерированных обучающих векторов  $u(n)$  и визуальных образов, наглядно описывающих ситуации, задаваемые сгенерированными обучающими векторами;

5. Определение экспертом, на основе своих знаний, в пределах рассматриваемой области  $O$ , одного из  $S$  классов, к которому относится каждый из  $K$  сгенерированных обучающих векторов  $u(n)$  входных сигналов ИНС;

6. Запись сгенерированных обучающих векторов  $u(n)$  и эталонных сигналов  $d_j(n)$ , соответствующих классам  $L_j(n)$  ситуаций, к которым, по мнению эксперта, относятся сгенерированные вектора, в виде пар  $\langle u(n), d_j(n) \rangle$  на носитель информации.

Эксперт в случае затруднения с определением принадлежности какого-либо из  $K$  сгенерированных обучающих векторов  $u(n)$  входных сигналов ИНС к тому или иному из  $S$  классов (этап 7 описанного выше порядка действий), имеет возможность отказаться от работы с данным вектором и повторно генерировать новые обучающие векторы (возврат к этапу 4) без определения их принадлежности до тех пор, пока он не сможет корректно определить принадлежность одного из вновь сгенерированных векторов.

Необходимое число  $K$  обучающих векторов ИНС (шаг 1 алгоритма) можно определить (Neyshabur, 2015: 1376–1401; Koltchinskii, 2002: 1–50; Bartlett, 1998: 525–536; Bartlett, 2002: 463–482) в соответствии с формулой:

$$K \geq \frac{w_c}{e}, \quad (1)$$

где  $w_c$  – количество свободных параметров ИНС,  
 $e \leq 1$  – допустимая ошибка классификации.

Значение  $K$  определяют с запасом 10–20 % от рассчитанного по формуле (1).

Блок-схема алгоритма формирования массива обучающих пар «стимул-реакция» приведена на рисунке 2.

Полученный таким способом массив обучающих пар обладает тем свойством, что число обучающих векторов  $u(n)$  неравномерно распределено по пространству признаков, ограниченному исследуемой областью  $O$ . Причем плотность векторов  $u(n)$  убывает по мере удаления от точек, описывающих наиболее типичных представителей каждого из исследуемых классов ситуаций. Для улучшения процесса обучения ИНС требуется провести обработку массива обучающих пар, полученного на предыдущем этапе.

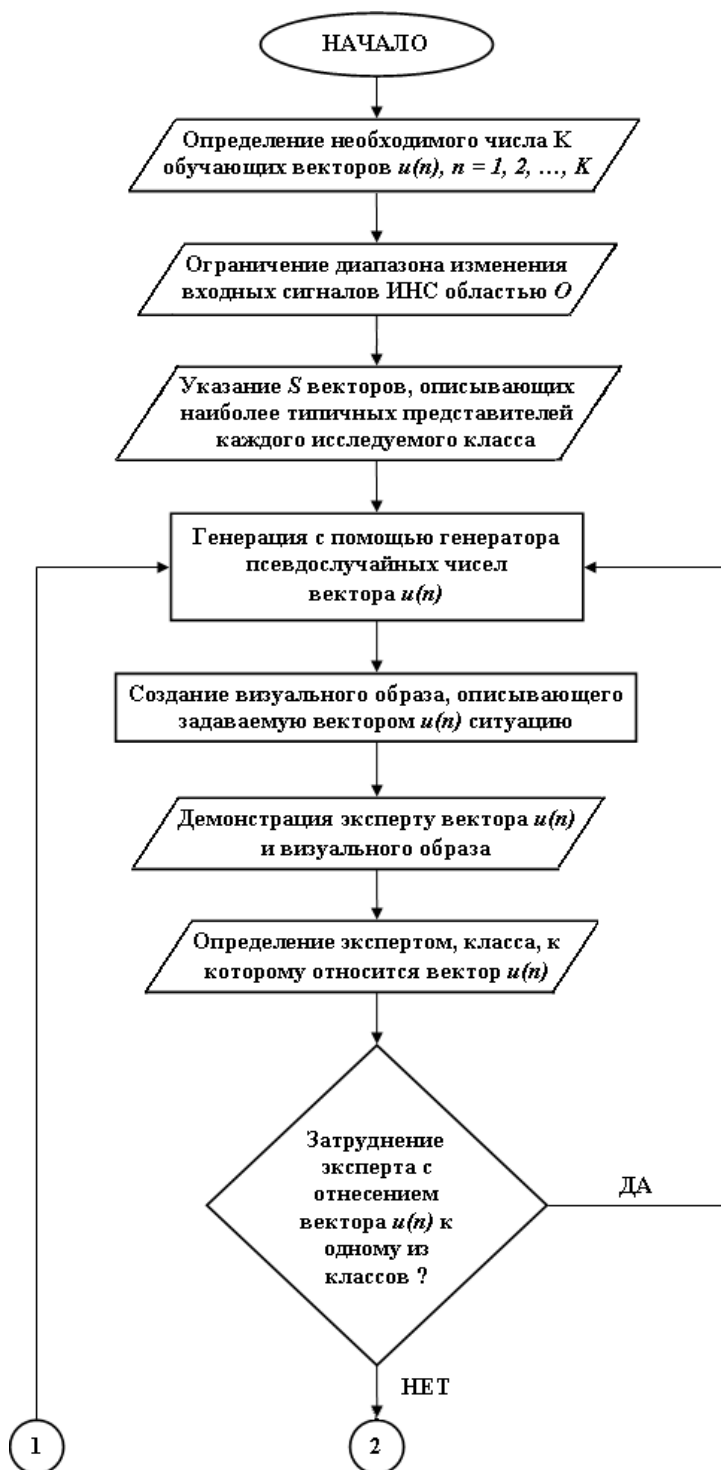


Рис. 2. Блок-схема алгоритма формирования массива обучающих пар «стимул-реакция» (начало)

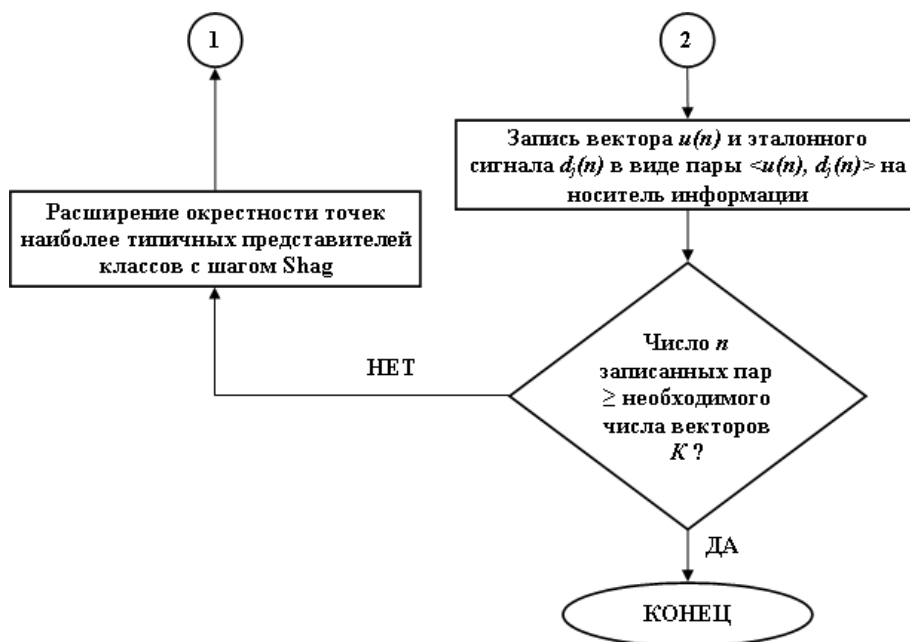


Рис. 3. Блок-схема алгоритма формирования массива обучающих пар «стимул-реакция» (окончание)

Алгоритм этапа обработки массива обучающих пар содержит шаги:

1. Разбиение рассматриваемой области  $O$  на  $col$  подобластей  $O_c$ ,  $C = 1, 2, \dots, col$  одинакового размера (на рис. 2.6 показано для случая, когда  $N = 2$ );

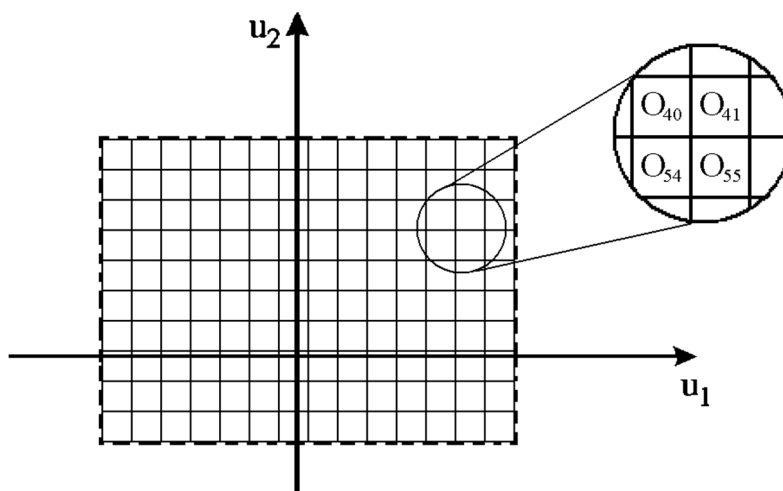


Рис. 4. Разбиение рассматриваемой области  $O$  на подобласти  $O_c$

1. Подсчет в массиве пар  $\langle u(n), d_j(n) \rangle$ , сохраненном на носителе информации, количества пар  $U_c$ , обучающие векторы которых  $u(n)$  принадлежат каждой подобласти  $O_c$ ;
2. Удаление из массива пар  $\langle u(n), d_j(n) \rangle$ , сохраненного на носителе информации, тех пар, количество обучающих векторов которых  $U_c$ , принадлежащих каждой подобласти  $O_c$ , превышает порог, обеспечивающий обучение ИНС, т.е.  $U_c > Porog$ , только в случае если все обучающие векторы в подобласти  $O_c$

- принадлежат к одному классу;
3. Перемешивание массива оставшихся после шага 3 обучающих пар  $\langle u(n), d_j(n) \rangle$  с использованием генератора псевдо случайных чисел.
- Блок-схема алгоритма обработки массива обучающих пар приведена на рисунке 5.



Рис. 6. Блок-схема алгоритма обучения ИНС

При другом варианте использования ИНС в виде «серого ящика» возможно исследование обученной ИНС с целью извлечения из нее знаний. Например, считав из ИНС вектор  $w(n)$  установившихся по окончании обучения значений синаптических весов межнейронных связей, можно подставить полученные значения в формулу решающей границы (7) персептрона и получить уравнение решающей границы между классами, используемое ИНС при классификации. Также к работоспособной ИНС может быть применена совокупность действий (Andrews, 1995: 373–389; Towell, 1993: 71–101), известная под названием «вербализация ИНС», позволяющая описать работу созданной и обученной ИНС совокупностью логических и/или алгебраических правил.

Предложенный метод обучения ИНС может быть использован для интеллектуализации СППУР в различных областях народного хозяйства.

Применение ИНС предоставляет возможность ее до обучения по мере накопления новых знаний в ходе эксплуатации системы и настройки под особенности места внедрения системы (например, конкретной железнодорожной станции).

Для обеспечения описанного метода интеллектуализации требуется синтезировать

структуру устройства обучения ИНС, которое может быть интегрировано в разрабатываемые на его основе СППУР. Этому будет посвящен следующий раздел диссертационной работы.

### **Заключение**

В представленной работе рассмотрена научно-практическая проблема обучения искусственных нейронных сетей в условиях дефицита обучающих данных и высокой степени слабо формализуемости предметной области. Актуальность данной проблемы обусловлена необходимостью интеллектуализации систем поддержки принятия управленческих решений, функционирующих в сложных условиях неопределённости, где традиционные методы статистического обучения оказываются недостаточно эффективными.

Реализация целей и методов исследования

Поставленная цель исследования — разработка метода обучения ИНС на основе знаний эксперта в условиях отсутствия достаточного массива наблюдений — была достигнута за счёт последовательного решения комплекса теоретических и прикладных задач. В рамках работы были обоснованы методологические подходы к интеграции экспертных знаний в процесс обучения ИНС, разработан метод формирования обучающей выборки в виде массива пар «стимул–реакция», а также предложены алгоритмы обработки обучающих данных и непосредственного обучения нейросетевой модели.

Использованные методы исследования — теория искусственных нейронных сетей, методы экспертных оценок, когнитивной визуализации многомерных данных и алгоритмического моделирования — обеспечили системное изучение поставленной проблемы. Особое значение имело применение визуальных образов ситуаций, синтезированных на основе сгенерированных входных векторов, что позволило приблизить процесс классификации к реальной профессиональной деятельности эксперта и тем самым повысить достоверность получаемых обучающих данных.

Таким образом, выбранные методы и подходы в полной мере соответствуют поставленной цели исследования и обеспечили её практическую реализацию.

В ходе выполнения работы получены следующие основные результаты.

Во-первых, разработан метод обучения ИНС, ориентированный на использование экспертных знаний как основного источника информации при формировании обучающей выборки. Метод позволяет осуществлять обучение ИНС даже при отсутствии репрезентативного массива наблюдений исследуемых ситуаций, что существенно расширяет область применения нейросетевых технологий.

Во-вторых, предложен алгоритм формирования массива обучающих пар «стимул–реакция», основанный на генерации входных векторов в ограниченной области признаков пространства и их последовательной экспертной классификации с использованием визуальных образов ситуаций. Такой подход обеспечивает выявление как осознаваемых, так и подсознательных компонентов экспертного знания, что ранее в рамках классических методов обучения ИНС практически не учитывалось.

В-третьих, разработан алгоритм обработки обучающей выборки, направленный на устранение избыточных данных и повышение эффективности обучения ИНС за счёт выравнивания распределения обучающих примеров в пространстве признаков. Это позволяет снизить влияние нерепрезентативных областей и повысить обобщающую способность обученной модели.

В-четвёртых, показано, что обученная предложенным способом ИНС может рассматриваться как формализованный «слепок» ментальной модели эксперта, представленный в виде совокупности настроенных параметров нейросетевой структуры. В зависимости от целей использования ИНС может применяться как в режиме «чёрного ящика», так и в режиме «серого ящика» с возможностью извлечения и интерпретации

знаний.

Полученные результаты подтверждают истинность выдвинутой в работе гипотезы о том, что обучение ИНС на основе экспертных решений, полученных при классификации визуально представленных ситуаций, позволяет сформировать нейросетевую модель, адекватно отражающую профессиональный опыт эксперта и обеспечивающую требуемое качество классификации в слабо формализуемых предметных областях.

В отличие от существующих подходов, ориентированных преимущественно на последующее извлечение знаний из обученной ИНС, предложенный метод принципиально изменяет сам процесс обучения, интегрируя экспертное знание на этапе формирования обучающей выборки. Тем самым расширяются теоретические представления о возможностях нейросетевых моделей как носителей экспертного знания и дополняется научное знание в области интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

#### Перспективы и возможности практического применения

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности их использования при разработке и внедрении интеллектуальных СППР в различных отраслях народного хозяйства, в том числе в системах управления и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на объектах транспортной инфраструктуры. Предложенный метод позволяет адаптировать ИНС к конкретным условиям эксплуатации и особенностям объекта внедрения без необходимости накопления большого объема статистических данных.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием аппаратно-программных средств обучения ИНС на основе экспертных знаний, автоматизацией процесса формирования визуальных образов ситуаций, а также с расширением класса используемых нейросетевых архитектур. Отдельный интерес представляет исследование возможностей коллективной экспертизы и объединения знаний нескольких экспертов в рамках единой нейросетевой модели.

Таким образом, результаты проведенного исследования вносят вклад в развитие теории и практики интеллектуализации систем поддержки принятия решений и создают научно-методическую основу для дальнейших исследований и прикладных разработок в области обучения искусственных нейронных сетей в условиях неопределенности и ограниченности данных.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Craven, 1996 — Craven M.W., Shavlik J. W. Extracting tree-structured representations of trained networks // *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. — 1996. — Vol. 8. — Pp. 24–30. [Eng.]
- Duch, 2001 — Duch W., Adamczak R., Grabczewski K. A new methodology of extraction, optimization and application of crisp and fuzzy logical rules // *IEEE Transactions on Neural Networks*. — 2001. — Vol. 12. — No. 2. — Pp. 277–306. [Eng.]
- Chernoff, 1973 — Chernoff H. The Use of Faces to Represent Points in K-Dimensional Space Graphically // *Journal of the American Statistical Association*. — 1973. — Vol. 68. — No. 342. — Pp. 361–368. [Eng.]
- Горохов, 2018 — Горохов В. Л., Барышев Ю. В., Витковский В. В. Методология когнитивной визуализации многомерных данных // *Мягкие измерения и вычисления (Системный анализ и моделирование)*. — 2018. — № 4. — С. 5–10. [Russ.]
- Neyshabur, 2015 — Neyshabur B., Tomioka R., Srebro N. Norm-based capacity control in neural networks. // *In Conference on Learning Theory*. 2015. P. — 1376–1401. [Eng.]
- Koltchinskii, 2002 — Koltchinskii V., Panchenko D. Empirical margin distributions and bounding the generalization error of combined classifiers. *Annals of Statistics*. — 2002. — Pp. 1–50. [Eng.]
- Bartlett, 1998 — Bartlett P.L. The sample complexity of pattern classification with neural networks: the size of the weights is more important than the size of the network. *IEEE transactions on Information Theory*. — 44(2). — 1998. — Pp. 525–536. [Eng.]
- Bartlett, 2002 — Bartlett P.L., Mendelson Sh. Rademacher and gaussian complexities: Risk bounds and structural results. *Journal of Machine Learning Research*. — 3(Nov), 2002. — Pp. 463–482. [Eng.]
- Andrews, 1995 — Andrews R., Diederich J., Tickle A. B. A survey and critique of techniques for extracting rules from trained artificial neural networks // *Knowledge-Based Systems*. — 1995. — Vol. 8. — No. 6. — P. 373–389. [Eng.]
- Towell, 1993 — Towell G. G., Shavlik J. W. Extracting refined rules from knowledge-based neural networks // *Machine Learning*. — 1993. — Vol. 13. — No. 1. — P. 71–101. [Eng.]

**REFERENCES**

- Craven 1996 — Craven, M. W., Shavlik, J. W. (1996). Extracting tree-structured representations of trained networks. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*. — 1996. — Vol. 8. — Pp. 24–30. [in Eng.]
- Duch 2001 — Duch, W., Adamczak, R., Grabczewski, K. (2001). A new methodology of extraction, optimization and application of crisp and fuzzy logical rules. *IEEE Transactions on Neural Networks*. — 2001. — Vol. 12. — No. 2. — Pp. 277–306. [in Eng.]
- Chernoff 1973 — Chernoff, H. (1973). The use of faces to represent points in K-dimensional space graphically. *Journal of the American Statistical Association*. — 1973. — Vol. 68. — No. 342. — Pp. 361–368. [in Eng.]
- Gorokhov 2018 — Gorokhov, V. L., Baryshev, Yu. V., Vitkovskiy, V. V. (2018). Methodology of cognitive visualization of multidimensional data [Metodologiya kognitivnoy vizualizatsii mnogomernykh dannykh]. *Myagkie izmereniya i vychisleniya (Sistemnyi analiz i modelirovanie)*, No. 4. — Pp. 5–10. [in Russ.]
- Neyshabur 2015 — Neyshabur, B., Tomioka, R., Srebro, N. (2015). Norm-based capacity control in neural networks. In *Proceedings of the Conference on Learning Theory*. — 2015. — Pp. 1376–1401. [in Eng.]
- Koltchinskii 2002 — Koltchinskii, V., Panchenko, D. (2002). Empirical margin distributions and bounding the generalization error of combined classifiers. *Annals of Statistics*. — 2002. — Pp. 1–50. [in Eng.]
- Bartlett 1998 — Bartlett, P. L. (1998). The sample complexity of pattern classification with neural networks: The size of the weights is more important than the size of the network. *IEEE Transactions on Information Theory*. — 1998. — Vol. 44. — No. 2. — Pp. 525–536. [in Eng.]
- Bartlett 2002 — Bartlett, P. L., Mendelson, S. (2002). Rademacher and Gaussian complexities: Risk bounds and structural results. *Journal of Machine Learning Research*. — Vol. 3 (Nov), 2002. — Pp. 463–482. [in Eng.]
- Andrews 1995 — Andrews, R., Diederich, J., Tickle, A. B. (1995). A survey and critique of techniques for extracting rules from trained artificial neural networks. *Knowledge-Based Systems*. — 1995. — Vol. 8. — No. 6. — Pp. 373–389. [in Eng.]
- Towell 1993 — Towell, G. G., Shavlik, J. W. (1993). Extracting refined rules from knowledge-based neural networks. *Machine Learning*. — 1993. — Vol. 13. — No. 1. — Pp. 71–101. [in Eng.]

**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 15.12.2024. Формат 60x84 1/8 . Бумага офсет №1. Гарнитура «Таймс» . Печать RISO.

Объем 15,1 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.