

ТРАНСПОРТ

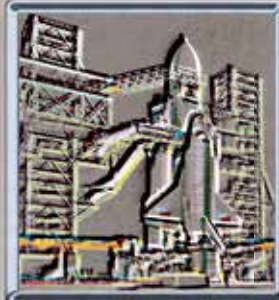
WORLD OF TRANSPORT
AND TRANSPORTATION

4 2024
Том / Vol. 22



**БАМ: 50 лет с начала
строительства**

**Baikal-Amur Mainline:
the 50th Anniversary of the
start of construction**



Вторая страница обложки
Inner cover



50-летие начала строительства Байкало-Амурской магистрали

В Тынде в честь 50-летия начала строительства БАМа встретились эстафетные поезда из Хабаровска и Иркутска, символизируя стыковку «золотого» звена БАМа. Составы в течение нескольких дней шли навстречу друг другу. В числе пассажиров – более 600 ветеранов и почетных гостей. Всего в столице БАМа собрались более 2 тысяч гостей со всей страны и бывших республик Советского Союза, чтобы вновь встретиться и вспомнить, как они полвека назад прокладывали дорогу сквозь бескрайнюю тайгу, реки и горные хребты Сибири и Дальнего Востока.

В этот же день был открыт памятник строителям магистрали. Композиция, вылитая из бронзы, установлена на гранитном постаменте. С обеих сторон скульптуры размещены сюжеты из жизни бамовцев и маршрут легендарной железной дороги. Автор памятника – народный художник России Салават Щербаков.

8 июля – один из главных дней в истории БАМа. Несмотря на то, что к лету 1974 года работа на магистрали уже вовсю кипела, и здесь трудились отряды комсомольцев, постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР № 561 «О строительстве Байкало-Амурской магистрали» определило этапы и сроки строительства, объемы беспрецедентного финансирования.

БАМ стал кузницей рекордов. Общая протяженность магистрали составляет 4287 км, она проходит через Восточную Сибирь и Дальний Восток к Тихому океану. А также пересекает территорию двух республик (Бурятии и Якутии), двух краев (Хабаровского и Забайкальского), двух областей (Иркутской и Амурской), проходит через 7 горных хребтов и 11 полноводных рек (среди них Лена, Витим, Олёкма, Амур, Зея, Селемджа, Буряя).

На прокладке путей в пиковый период строительства было занято около 130 тысяч советских граждан, а за всю историю в сооружении Байкало-Амурской

магистрали приняли участие свыше 2 миллионов человек, в том числе представители 13 республик СССР и 22 автономий РСФСР.

Работы проходили в сложных климатических и геологических условиях, что требовало огромного вклада от всех сфер государства, но прежде всего от тех людей, которые непосредственно принимали участие в строительстве. Создатели БАМа решили задачу общегосударственного уровня, открыли доступ к природным ресурсам огромного региона, построили кратчайший межконтинентальный железнодорожный маршрут Восток – Запад и укрепили военно-стратегическое положение страны.

Символично, что к 40-летию БАМа, 8 июля 2014 года, Президент России Владимир Путин дал официальный старт «БАМу-2» – крупнейшей современной стройке на Восточном полигоне. Проект расширения БАМа направлен на увеличение транспортной связности России со странами Азиатско-Тихоокеанского региона и улучшение условий социально-экономического развития Дальнего Востока.

В 2024 году по поручению Главы государства утвержден третий этап работ инвестиционного проекта по модернизации железнодорожной инфраструктуры БАМа и Транссиба до 2035 года. В рамках проекта создается принципиально новая по качеству железнодорожная инфраструктура с привлечением самых передовых технико-технологических решений. В условиях повышенного спроса на грузоперевозки в Восточном направлении развитие БАМа и Транссиба является одной из ключевых национальных задач.

По информации пресс-центра
Министерства транспорта
Российской Федерации:
<https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11342> ●

ТРАНСПОРТ МИР

• ТЕОРИЯ • ИСТОРИЯ
• КОНСТРУИРОВАНИЕ БУДУЩЕГО

4 2024
(113)

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКА И ТЕХНИКА

<i>Егор ДЫЛЁВ, Евгений АШПИЗ</i>	
Моделирование работы балластной призмы с подшпальными прокладками	6
<i>Живко ЯНЕВ, Никита ЛУГОВСКИЙ, Юрий ПАЗОЙСКИЙ, Сергей КАЛИНИН</i>	
Алгоритм оцифровки технологических графиков обработки поездов на железнодорожных станциях	13
<i>Татьяна ПОПОВА, Владимир ФЕДИН, Александр ПОПОВ</i>	
Улучшение показателей качества шпинтонов путем изменения технологических решений при их изготовлении	22
<i>Игорь РОЗЕНБЕРГ, Яков ДАЛИНГЕР</i>	
Анализ работы распределенного реестра данных на примере аэропорта	27
<i>Глеб ОГУРЦОВ, Николай ЕРМОШИН</i>	
Метод определения долговечности пролётного строения моста	33

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

<i>Марина БОТНАРЮК, Наталья КСЕНЗОВА</i>	
Эконометрическая модель прогноза грузооборота морских портов	44
<i>Валерий ХАЙТБАЕВ, Евгений ЧЕРНЯЕВ</i>	
Оценка влияния пространственной модели терминально-складских комплексов на региональные экономические показатели	54
<i>Максим КУДРЯШОВ, Максим СКОРКИН</i>	
Анализ методических подходов к выбору муниципальных маршрутов регулярных перевозок для эксплуатации электробусов	61
<i>Виктор ПОДСОРИН, Владимир БУРОВЦЕВ, Андрей КОБЫЛИЦКИЙ, Анастасия КУРАНОВА</i>	
Методическая основа классификации пригородных пассажирских компаний в России	69

Издается
Российским университетом
транспорта.

Учрежден МИИТ в 2003 году
Редакционный совет:

И. Н. Розенберг – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, научный руководитель РУТ (МИИТ), председатель совета

А. К. Головнич – доктор технических наук, доцент Белорусского государственного университета транспорта

А. Д. Гишиани – доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН

А. А. Горбунов – доктор политических наук, профессор РУТ

Б. В. Гусев – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН

Н. А. Духно – доктор юридических наук, профессор РУТ

Д. Г. Евсеев – доктор технических наук, профессор РУТ

Н. С. Касимов – доктор географических наук, профессор, академик РАН

В. И. Колесников – академик РАН, профессор Ростовского государственного университета путей сообщения

К. Л. Комаров – доктор технических наук, профессор Сибирского государственного университета путей сообщения

Б. М. Куанышев – доктор технических наук, профессор, заместитель председателя КАЗПРОФТРАНС (Республика Казахстан)

Б. М. Лапидус – доктор экономических наук, профессор

Г. Г. Матишов – доктор географических наук, профессор, академик РАН

Д. А. Мачерет – доктор экономических наук, профессор РУТ, первый заместитель председателя Объединённого учёного совета ОАО «РЖД»

Л. Б. Миротин – доктор технических наук, профессор Московского автомобильного государственного технического университета (МАДИ)

К. А. Пашков – доктор медицинских наук, профессор РАН, профессор Московского государственного медицинского-стоматологического университета им. А.И. Евдокимова

А. В. Сладковски – доктор технических наук, профессор Силезского технологического университета (Республика Польша)

С. С. Соколов – доктор технических наук, профессор РУТ

Ю. И. Соколов – доктор экономических наук, профессор РУТ

А. А. Соловьев – доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН

Тран Дак Су – доктор технических наук, профессор Университета транспорта и коммуникаций (Ханой, Вьетнам)

В. Я. Цветков – доктор технических наук, доктор экономических наук

Т. В. Шепитько – доктор технических наук, профессор РУТ

**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ**

И. Н. РОЗЕНБЕРГ –
главный редактор
Е. Ю. ЗАРЕЧКИН –
заместитель главного редактора

**ЧЛЕНЫ
РЕДКОЛЛЕГИИ**

Е. С. АШПИЗ –
д.т.н., доцент РУТ
Л. А. БАРАНОВ –
д.т.н., профессор РУТ
А. М. БЕЛОСТОЦКИЙ –
д.т.н., профессор РУТ
Г. В. БУБНОВА –
д.э.н., профессор РУТ
Ю. А. БЫКОВ –
д.т.н., профессор РУТ
В. А. ГРЕЧИШНИКОВ –
д.т.н., доцент РУТ
М. М. ЖЕЛЕЗНОВ –
д.т.н., профессор, доцент МГСУ
В. Б. ЗЫЛЁВ –
д.т.н., профессор РУТ
В. И. КОНДРАЩЕНКО –
д.т.н., старший научный
сотрудник РУТ
А. А. ЛОКТЕВ –
д.ф.-м.н., профессор РУТ
С. Я. ЛУЦКИЙ –
д.т.н., профессор РУТ
О. Е. ПУДОВИКОВ –
д.т.н., доцент РУТ
В. Н. СИДОРОВ –
д.т.н., профессор РУТ
Н. П. ТЕРЁШИНА –
д.э.н., профессор РУТ
В. С. ФЁДОРОВ –
д.т.н., профессор РУТ
Н. А. ФИЛИППОВА –
д. т. н., профессор, доцент МАДИ
В. М. ФРИДКИН –
д.т.н., старший научный
сотрудник РУТ
С. С. ЧИБУХЧЯН –
к.т.н., доцент Национального
политехнического университета
Армении, заместитель
Председателя республиканского
союза работодателей Армении
В. А. ШАРОВ –
д.т.н., профессор РУТ
А. К. ШЕЛИХОВА –
руководитель редакции

РЕДАКЦИЯ

Н. К. ОЛЕЙНИК –
технический редактор
М. В. МАСЛОВА –
английский перевод

При перепечатке ссылка
на журнал «Мир транспорта»
обязательна.
© «Мир транспорта», 2024

*Виктория ВИТОВСКАЯ, Алексей ДАВЫДОВ,
Александр КОМЯКОВ*

Влияние составности поездов на характер
воздействия факторов, влияющих на энергопотребление 76

Ольга СУШКО

Стратегирование деятельности авиакомпании 84

Илья УРЮПИН, Андрей ВЛАСЕНКО

Моделирование оценки потенциала изменения тарифов
на авиаперевозки на основе составляющих себестоимости 94

Василий ЖУКОВ

Цифровые технологии в грузовых авиаперевозках 104

КОЛЕСО ИСТОРИИ

Дмитрий МАЧЕРЕТ, Анастасия КУДРЯВЦЕВА

Инновационная основа укрепления рыночных позиций
железных дорог (на примере российского рынка
грузовых перевозок конца XIX – начала XX вв.) 112

КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ

Василий КУПРИЯНОВСКИЙ

Подготовка профессиональных аналитиков:
сложные вопросы, непростые ответы 124

Авторефераты диссертаций 129

Новые книги о транспорте 132

Журнал зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации
по делам печати, телерадиовещания и средств массовых
коммуникаций 20 декабря 2002 г. Регистрационный номер
ПИ № 77-14165.

Журнал выходит 6 раз в год. Номер подписан в печать 20.11.2024.

Тираж 150 экз. Цена свободная.

Отпечатано с оригинал-макета ИП Копыльцов Павел Иванович,
г. Воронеж, ул. Маршала Неделина, д. 27, кв. 56.

Ознакомиться с содержанием вышедших номеров можно
на сайте научной электронной библиотеки elibrary.ru или
на сайте <https://mirtr.elpub.ru>, с условиями публикации –
на сайте <https://mirtr.elpub.ru>.

**Журнал включён в Российский индекс научного цитирования,
информация размещается в базах данных РГБ, Соционет,
Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat.org.**

World of Transport and Transportation

•THEORY
•HISTORY
•ENGINEERING
OF THE FUTURE

Vol. 22²⁰²⁴
Iss. 4

The journal is published
by Russian University
of Transport.

Founded in 2003 by MIIT.

EDITORIAL COUNCIL

Igor N. Rozenberg, D.Sc. (Engineering),
Professor, Corresponding Member of
the Russian Academy of Sciences, Chief
Scientific Officer of Russian University
of Transport, chairman of the Editorial
council

Alexander C. Golovnich, D.Sc.
(Engineering), Associate Professor of
Belarusian State Transport University

Alexander A. Gorbunov, D.Sc. (Political
Science), Professor of Russian University
of Transport

Boris V. Gusev, D.Sc. (Engineering),
Professor, Corresponding Member of the
Russian Academy of Sciences

Alexey D. Gvishiani, D.Sc. (Physics and
Mathematics), Professor, Member of the
Russian Academy of Sciences

Nickolay A. Duhno, D.Sc. (Law),
Professor of Russian University of
Transport

Dmitry G. Evseev, D.Sc. (Engineering),
Professor of Russian University of
Transport

Nikolai S. Kasimov, D.Sc. (Geography),
Professor, Member of the Russian
Academy of Sciences

Vladimir I. Kolesnikov, D.Sc.
(Engineering), Member of the Russian
Academy of Sciences, Professor of
Rostov State Transport University

Constantine L. Komarov, D.Sc.
(Engineering), Professor of Siberian
Transport University

Bakytzhan M. Kuanyshev, D.Sc.
(Engineering), Professor, Deputy
Chairman of KAZPROFTRANS (Republic
of Kazakhstan)

Boris M. Lapidus, D.Sc. (Economics),
Professor

Dmitry A. Macheret, D.Sc. (Economics),
Professor of Russian University of
Transport, First Deputy Chairman of
Joint Scientific Council of JSC Russian
Railways

Gennady G. Matishov, D.Sc.
(Geography), Professor, Member of the
Russian Academy of Sciences

Leonid B. Mirotn, D.Sc. (Engineering),
Professor of Moscow State Automobile
and Road Technical University

Konstantin A. Pashkov, D.Sc.
(Medicine), Professor of the Russian
Academy of Sciences, Professor of A.I.
Yevdokimov Moscow State University of
Medicine and Dentistry

Taisiya V. Shepitko, D.Sc. (Engineering),
Professor of Russian University of
Transport

Aleksander V. Sladkowski, D.Sc.
(Engineering), Professor of Silesian
University of Technology (Republic of
Poland)

Sergey S. Sokolov, D.Sc. (Engineering),
Professor of Russian University of
Transport

Yury I. Sokolov, D.Sc. (Economics),
Professor of Russian University of
Transport

Anatoly A. Soloviev, D.Sc. (Physics and
Mathematics), Corresponding Member
of the Russian Academy of Sciences,
Professor of the Russian Academy of
Sciences

Tran Dac Su, D.Sc. (Engineering),
Professor of the University of Transport
and Communications (Hanoi, Vietnam)

Victor Ya. Tsvetkov, D.Sc. (Economics),
D.Sc. (Engineering)

CONTENTS

Page numbering below refers to the texts in English

SCIENCE AND ENGINEERING

Egor O. DYLEV, Evgeny S. ASHPIZ

Modelling the Operation of a Ballast Prism with Under-Sleeper Pads 134

*Zhivko YANEV, Nikita V. LUGOVSKY,
Yuri O. PAZOYSKY, Sergey V. KALININ*

Algorithm for Digitalising Technological Schedules
of Train Processing Operations at Railway Stations 141

Tatiana A. POPOVA, Vladimir M. FEDIN, Alexander P. POPOV

Improving Quality of Guide Rods for Rail Vehicles'
Suspension Systems by Changing Technology of their Manufacture 149

Igor N. ROZENBERG, Iakov M. DALINGER

Analysis of the Operation of a Distributed Ledger:
An Example of the Airport 153

Gleb L. OGURTSOV, Nikolay A. ERMOSHIN

Method for Determining Durability of a Bridge Superstructure 158

MANAGEMENT, CONTROL AND ECONOMICS

Marina V. BOTNARYUK, Natalia N. KSENZOVA

Econometric Model for Forecasting Cargo Turnover at Seaports 168

Valery A. KHAITBAEV, Evgeny V. CHERNIAEV

Assessment of the Impact of the Spatial Model of Terminal
and Warehouse Complexes on Regional Economic Indicators 178

Maxim A. KUDRYASHOV, Maxim V. SKORKIN

Analysis of Methodological Approaches to the Selection
of Regular Municipal Routes to be Served by Electric Buses 185

*Victor A. PODSORIN, Vladimir V. BUROVTSEV,
Andrey N. KOBYLITSKY, Anastasia A. KURANOVA*

Methodological Foundations for Classification of Suburban
Passenger Companies in Russia 193

EDITORIAL BOARD

Igor N. Rozenberg, Editor-in-Chief

Evgeny Yu. Zarechkin, Deputy Editor-in-Chief

BOARD MEMBERS

Evgeny S. Ashpiz, D.Sc. (Engineering), Associate Professor of Russian University of Transport

Leonid A. Baranov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Alexander M. Belostotskiy, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Galina V. Bubnova, D.Sc. (Economics), Professor of Russian University of Transport

Yury A. Bykov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Suren S. Chibukhchyan, Ph.D. (Engineering), Associate Professor of the National Polytechnic University of Armenia, Vice-Chairman of National Employer's Union

Victor S. Fedorov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Vladimir M. Fridkin, D.Sc. (Engineering), senior researcher of Russian University of Transport

Victor A. Grechishnikov, D.Sc. (Engineering), Associate Professor of Russian University of Transport

Valeriy I. Kondraschenko, D.Sc. (Engineering), senior researcher of Russian University of Transport

Alexey A. Loktev, D.Sc. (Physics and Mathematics), Professor of Russian University of Transport

Svyatoslav Y. Lutskiy, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Nadezhda A. Filippova, D.Sc. (Engineering), Professor, Associate Professor of MADI university

Oleg E. Pudovikov, D.Sc. (Engineering), Associate Professor of Russian University of Transport

Victor A. Sharov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Alla K. Shelikhova, head of Editorial office

Vladimir N. Sidorov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Natalia P. Teryoshina, D.Sc. (Economics), Professor of Russian University of Transport

Maxim M. Zheleznov, D.Sc. (Engineering), Professor, Associate Professor of MGSU university

Vladimir B. Zylyov, D.Sc. (Engineering), Professor of Russian University of Transport

Victoria V. VITOVSKAYA, Alexey I. DAVYDOV, Alexander A. KOMYAKOV

The Influence of Train Composition on the Nature of the Impact of Factors Affecting Energy Consumption 200

Olga P. SUSHKO

Building an Airline Strategy 208

Ilya V. URYUPIN, Andrey O. VLASENKO

Modelling the Assessment of the Potential Changes in Air Transportation Rates Based on Cost Components 218

Vasily E. ZHUKOV

Digital Technology in Air Cargo Transportation 227

HISTORY WHEEL

Dmitry A. MACHERET, Anastasia V. KUDRYAVTSEVA

Innovations as Basis for Strengthening the Market Position of Railways (example of the Russian cargo transportation market in the late 19th – early 20th centuries) 234

BIBLIO-DIRECTIONS

Vasily P. KUPRIYANOVSKIY

Professional Analyst Training:
Challenging Questions, Not Easy Answers 246

Selected Abstracts of Ph.D. Theses Submitted
at Russian Transport Universities 249

New Books on Transport and Transportation 252

Published quarterly since 2003. Bimonthly since 2013.

113 issues have been published since 2003.

Current issues are circulated in 150 hard copies available on subscription.

All articles in the journal are published in Russian and English, both versions being entirely identical. The emails of corresponding authors are marked with ✉.

The open accessed full texts of the articles, editorial politics and guidelines for the authors are available at the Website of the journal at <https://mirtr.elpub.ru/jour> (both in Russian and English). The authors can submit their articles either in Russian or in English. The journal uses double-blind peer reviewing.

The full texts in Russian and key information in English are also available at the Website of the Russian scientific electronic library at <https://www.elibrary.ru> (upon free registration). EDN in references means eLibrary digital number.

The journal is indexed in Russian scientific citation index system, Russian state library, Socionet, Ulrichsweb, WorldCat.org, etc.

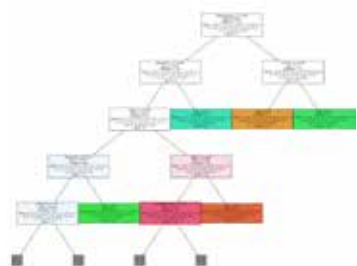
Any reproduction in whole or in part on any medium or use of English translation of the articles contained herein is prohibited for commercial use without the prior written consent of World of Transport and Transportation.



СТРОИТЕЛЬСТВО ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

6

Моделирование балластной призмы.

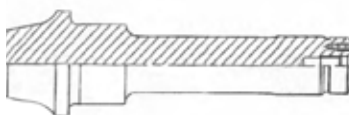


ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЕ СТАНЦИИ

13

*Цифровые технологические
графики обработки поездов.*

НАУКА И ТЕХНИКА



РЕЛЬСОВЫЙ ТРАНСПОРТ

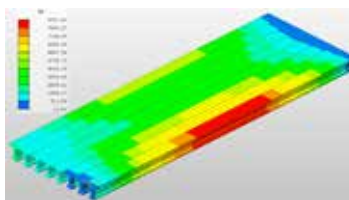
22

*Рессорное подвешивание вагонов
метро.*

АЭРОПОРТЫ

27

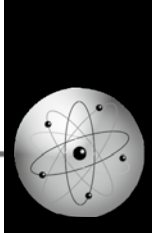
Распределенный реестр данных.



МОСТЫ

33

*Методы определения
долговечности пролётных
строений.*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 625.142.625.141
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-1>

Моделирование работы балластной призмы с подшпальными прокладками



Егор ДЫЛЁВ



Евгений АШПИЗ

Егор Олегович Дылёв¹,
Евгений Самуилович Ашпиз²

^{1, 2}Российский университет транспорта,
Москва, Россия.

¹ ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0665-822X>;
РИИЦ SPIN-код: 6475-9848; РИИЦ AuthorID:
1157251.

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1334-2117>;
РИИЦ SPIN-код: 5412-7662; РИИЦ
AuthorID: 169354.

✉ ¹ dylev.egor@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Важным условием для эксплуатации особогрузонапряженных линий является обеспечение стабильности геометрии рельсовой колеи, в том числе в вертикальной плоскости, которая во многом зависит от стабильности подшпального основания и, в том числе, от отсутствия остаточной деформации балластного слоя.

В статье приведен анализ результатов исследования по уменьшению остаточных деформаций балластного слоя при помощи подшпальных прокладок. Целью данной работы является оценка их влияния на работу балластной призмы

в период стабилизации и период нормальной его работы. В лаборатории получен график осадки штампа, определена интенсивность его осадки, измерена площадь контакта подошвы штампа с балластом, рассчитаны контактные напряжения и построен график изменения модуля упругости модели.

По результатам исследования выявлено, что подшпальные прокладки помогают уменьшить остаточные деформации балластного слоя в период его стабилизации и уменьшить интенсивность осадки в основной период его работы.

Ключевые слова: железнодорожный путь, подшпальные прокладки, модуль упругости пути, балластный слой, осадка рельса, остаточные деформации балласта.

Для цитирования: Дылёв Е. О., Ашпиз Е. С. Моделирование работы балластной призмы с подшпальными прокладками // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-1>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Стабильность геометрии рельсовой колеи является важным условием безопасной эксплуатации железных дорог с интенсивным движением и большим объемом перевозок грузов. В еще большей мере это относится к особогруженонапряженным линиям¹, протяженность которых, например, на сети ОАО «РЖД» составляет на сегодня 16 тыс. км [1].

Исследованиям накопления остаточных деформаций в балластном слое были посвящены работы ученых ВНИИЖТ во второй половине XX века [2–5], в результате чего было сформировано основное понимание работы этого элемента конструкции пути. Рассматривая работу балластного слоя железнодорожного пути, С. Н. Попов указывал, что для обеспечения длительной стабильности подшпального основания на линиях с высокой грузонапряженностью необходимо иметь такую конструкцию пути, в которой балластный слой работал бы на всем протяжении пути с равномерным накоплением остаточных деформаций [2]. Изучая характер накопления остаточных деформаций балластного слоя на протяжении его жизненного цикла, он выделил четыре характерных периода, которые описал следующим образом: во время периода 1 (период стабилизации) происходит интенсивное накопление остаточных деформаций

ций за счет переупаковки зерен и окола их острых граней, которое к концу резко снижается, и в периоде 2 (период нормальной работы) накопление остаточной деформации становится минимальным. Период 3 характеризуется ростом накопления остаточных деформаций, который связан с загрязненностью щебня к концу срока его эксплуатации. В периоде 4 происходит чрезмерно интенсивное накопление осадки, наступающее вследствие невыполнения своевременного ремонта пути.

Основной причиной накопления остаточных деформаций в балласте в процессе эксплуатации В. И. Лысюк считал динамическое воздействие поездов на путь [3], которое тем сильнее, чем выше жесткость верхнего строения. Примером увеличения жесткости пути является переход с деревянных шпал на железобетонные. Такое изменение конструкции повлекло за собой повышение динамического воздействия поездов на путь и, соответственно, рост интенсивности накопления остаточных деформаций в балластном слое, что отмечалось в работе В. Ф. Федулова [4]. Наибольшие проблемы при этом возникают при динамическом воздействии в зоне рельсового стыка, для решения которых в работе [5] предлагалось добиться уменьшения остаточных деформаций балласта устройством упругой связи по нижней опорной поверхности железобетонной шпалы, которая улучшит условия контакта частиц щебня с подошвой шпалы, уменьшит его дробимость и истирание.

¹ СП 119.13330.2012 Железные дороги колеи 1520 мм. Актуализированная редакция СНиП 32-01-95. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200095541?ysclid=m7endu1tqq310261972>. Доступ 21.08.2024.

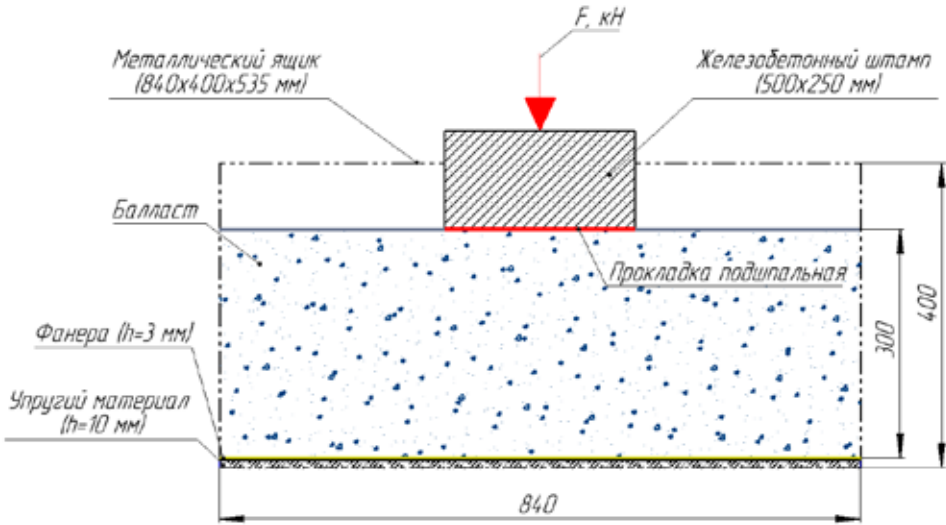


Рис. 1. Схема устройства лабораторной модели [выполнено авторами].



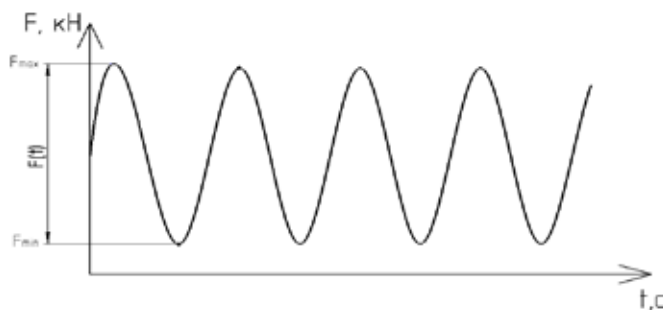


Рис. 2. График приложения нагрузки к модели. $F_{\max} = 40,63 \text{ кН}$; $F_{\min} = 4,06 \text{ кН}$ [выполнен авторами].

В зарубежных странах на ряде участков снижение напряжений в балластном слое достигается за счет применения подшпальных прокладок (далее – ПШП) [6]. В России исследования эффективности ПШП стали проводиться с середины XX века [5; 7; 8], но в основном они были направлены на обеспечение стабильности пути в стыковых зонах. В частности, в работе В. Н. Каплина [9] подтверждена технико-экономическая эффективность применения ПШП при выправке пути в стыках.

На современном этапе повышения поездной нагрузки на путь необходимо исследовать вопрос эффективности применения ПШП и вне зоны стыков, рассмотрев возможность снижения накопления деформаций в условиях бесстыкового пути, что стало целью исследования, результаты которого приводятся в статье.

Исходя из приведенной выше характеристики четырех периодов работы балластной призмы, сформулированной С. Н. Поповым, можно предположить, что ПШП, благодаря уменьшению контактных напряжений, должны уменьшить осадку балластного слоя в периоды 1 и 2 его работы, а на периоды 3 и 4 оказывать влияние не будут, так как основное влияние на увеличение осадки в это время оказывает его загрязненность.

Для подтверждения представленной гипотезы было принято решение о проведении лабораторного эксперимента, целью которого было определение влияния ПШП на периоды 1 и 2 работы балластного слоя.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Условия испытаний

Моделирование работы балластного слоя выполнено как моделирование в двухмерном пространстве, где за плоскость моделирования принимается плоскость вдоль пути в подрельсовой зоне. Возможность проведения

такого опыта была подтверждена в работе [10] при изучении деформационных свойств загрязненного балласта.

Схема модели приведена на рис. 1.

Модель собиралась в металлическом ящике, размеры которого составляли: вдоль оси пути – 850 мм (минимальный размер для исключения влияния граничных условий), а поперек – 535 мм (наименьший размер для испытаний щебня должен превышать максимальный размер частиц щебня не менее чем в пять раз [11]), высота – 400 мм.

В основании ящика укладывался упругий мат толщиной 10 мм, который моделировал основную площадку земляного полотна (далее – ОПЗП). Для исключения местных деформаций на упругий слой укладывалась фанера толщиной 3 мм. Такая конструкция позволила добиться модуля деформации ОПЗП в 80 МПа. При этом толщина балластного слоя составляла 30 см.

На следующем этапе послойно укладывался гранитный щебень второй категории, зерновой состав которого соответствует ГОСТ 7392². Толщина слоя составляла 100 мм. Каждый слой уплотнялся при помощи деревянного штампа размером 830x525 мм. К первым двум слоям нагрузка прикладывалась в количестве 10 тыс. циклов, к третьему слою – в количестве 500 тыс. циклов. График приложения нагрузки представлен на рис. 2. Частота приложения нагрузки равна 8 Гц. Данный режим уплотнения позволяет добиться наилучшего уплотнения [12].

После уплотнения устанавливался железобетонный штамп. Для обеспечения реального контакта между шпалой и балластом, штамп

² ГОСТ 7392-2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути. Технические условия. [Электронный ресурс]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293762/4293762301.pdf?ysclid=m872wmf7pk430161462>. Доступ 21.08.2024.



Рис. 3. Лабораторная модель в сборе [выполнено авторами].



Рис. 4. Внешний вид ПШП мягкого типа после испытаний [выполнено авторами].

был вырезан из средней части шпалы под-
типа ШЗ-Д 4х10. Фото собранной модели
приведено на рис. 3.

В момент проведения самого экспери-
мента к модели прикладывалась нагрузка так
же, как и во время уплотнения, согласно
рис. 2. Максимальная сила позволяет достичь
допустимых напряжений под подошвой
шпалы от вагонов, равных 325 кПа. Данное
значение напряжений установлено в Методи-
ке оценки воздействия подвижного состава
на путь по условиям обеспечения надежно-
сти³ (далее – Методика).

Количество циклов в эксперименте со-
ставляло 2 млн.

Частота воздействия нагрузки составляет
8 Гц. Обоснованием принятой частоты воз-
действия явились следующие параметры:
база тележки размером 1850 мм и среднесе-
тевая скорость, равная 55 км/ч (15,28 м/с).

³ Методика оценки воздействия подвижного состава на
путь по условиям обеспечения надежности, утвержденная
распоряжением ОАО «РЖД» от 22.12.2017 № 2706р.
[Электронный ресурс]: https://meganorm.ru/mega_doc/norm/metodika/0/metodika_otsenki_vozdeystviya_podvizhnogo_sostava_na_put_po.html. Доступ 27.08.2024.

Было выполнено три эксперимента, кото-
рые между собой имели различия в контакте
между подошвой штампа и балластом:

- модель № 1 – без ПШП;
- модель № 2 – с ПШП мягкого типа;
- модель № 3 – с ПШП среднего типа.

Сборка каждой из представленных моде-
лей происходила согласно представленному
выше описанию.

ПШП изготовлены из полиолефинового
материала, толщиной 10 мм и с распределен-
ным статическим модулем упругости
0,14 Н/мм³ (мягкого типа) и 0,24 Н/мм³ (сред-
него типа).

Типы ПШП соответствуют техническим
требованиям ЦДИ.02.2020⁴.

Результаты лабораторного эксперимента

После завершения эксперимента был про-
веден визуальный осмотр состояния ПШП.
Стоит отметить, что, проведя циклические
испытания под нагрузкой, которая вызывает
максимально допустимые напряжения под

⁴ Прокладки подшпальные. Технические требования.
ЦДИ.02.2020.





Рис. 5. Внешний вид ПШП среднего типа после испытаний [выполнено авторами].

Таблица 1

Интенсивность осадки штампа [выполнено авторами]

Модель	Величина осадки после окончания первого периода (на 100 тыс. циклов), мм	Осадка штампа после 2 млн циклов, мм	Интенсивность осадки во время второго периода, мм/млн циклов
Без ПШП	7,70	9,75	1,03
С ПШП среднего типа	4,28	6,38	1,00
С ПШП мягкого типа	3,22	5,05	0,92

подошвой шпалы, на ПШП не было сквозных пробоев и трещин. На рис. 4 и 5 приведены фото ПШП после испытаний.

На рис. 6 приведен график осадки штампа в трех моделях, из которого видно, что осадка балласта в конце первого периода его работы уменьшилась в моделях с ПШП примерно в два раза.

Отметки уровня штампа по окончании первого периода работы и в конце эксперимента были вынесены в табл. 1 для того, чтобы дать оценку эффективности использования ПШП.

Анализ результатов, представленных в табл. 1, показывает, что использование ПШП среднего типа позволило уменьшить

осадку штампа в конце первого периода работы балластной призмы на 44 %, а мягкого типа – на 58 %. Также необходимо отметить, что использование ПШП привело к уменьшению интенсивности осадки штампа во втором периоде работы балластной призмы. Так ПШП среднего типа уменьшили интенсивность на 3 %, а ПШП мягкого типа – на 11 %.

Разницы в изменении зернового состава щебня между тремя моделями после эксперимента не обнаружено (табл. 2). Данный результат может быть объяснен следствием режима уплотнения балласта перед проведением самого эксперимента, который привел к образованию мелкой фракции еще на подготовительном этапе, за счет окола острых

Таблица 2

Изменение зернового состава щебня [выполнено авторами]

Размер сита, мм	До испытания		После испытания					
			Без ПШП		С ПШП мягкого типа		С ПШП среднего типа	
	%	кг	%	кг	%	кг	%	кг
60	1,6	4	1,6	4	1,6	4	1,6	4
40	73,4	183,5	72,9	182,3	72,5	181,2	72,9	182,3
25	25	62,5	25	62,4	25,5	63,7	24,9	62,3
от 0,01 до 25	-	-	0,5	1,3	0,5	1,2	0,5	1,4
Всего	100	250	100	250	100	250	100	250

Таблица 3

Площадь контакта подошвы штампа с балластом [выполнено авторами]

Параметр	Без ПШП	С ПШП мягкого типа	С ПШП среднего типа
Площадь контакта подошвы штампа с балластом, %	9	20	20
Контактные напряжения, МПа	3,61	1,63	1,63

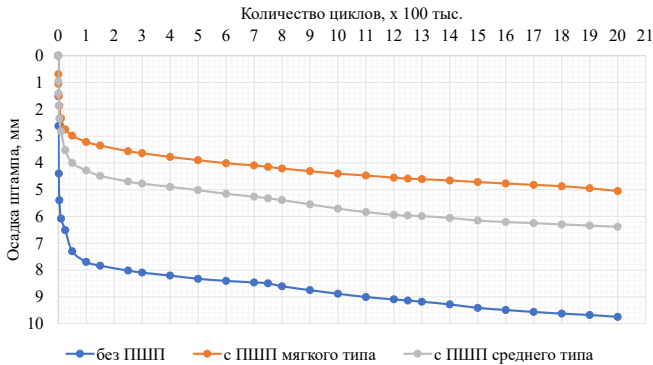


Рис. 6. График осадки штампа [выполнено авторами].

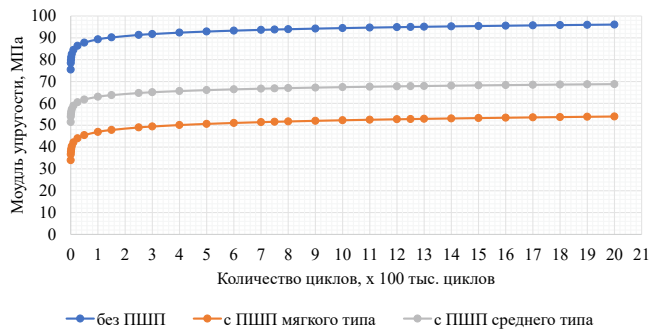


Рис. 7. Изменение модуля упругости модели [выполнено авторами].

граней зерен щебня. Вследствие этого можно сделать вывод о том, что ПШП оказывают влияние на состояние щебня за счет уменьшения окола острых граней, который получается благодаря распределению напряжений на большую площадь.

Для определения контактных напряжений в балласте были измерены площади контакта зерен щебня по нижней поверхности шпалы, которые определялись при помощи растрового метода. Величины площадей контакта и контактных напряжений представлены в табл. 3.

Результат показал, что при применении подшпальных прокладок площадь контакта щебня со шпалой увеличилась в 2,20 раза, а, следовательно, контактные напряжения упали во столько же раз. Соответственно данное снижение напряжений повлечет за собой уменьшение околостранных граней зерен щебня, их переупаковку, а, следова-

тельно, повысит стабильность железнодорожного пути в вертикальной плоскости.

Кроме приведенных данных по накоплению величины остаточных осадок для каждой модели было определено изменение модуля упругости пути в течение эксперимента по формуле (1):

$$U = \frac{\alpha \omega C}{l}, \tag{1}$$

где α – коэффициент изгиба шпал, т.е. отношение средней осадки шпалы к ее осадке под рельсом;

ω – площадь полушпалы;
 C – коэффициент постели шпалы;
 l – расстояние между шпалами.

В свою очередь коэффициент постели шпалы C вычислялся по формуле (2):

$$C = \frac{\Delta F}{\Delta y_{\omega}}, \tag{2}$$

где ΔF – среднее приращение нагрузки на полушпалу;





Δu – соответствующее приращение перемещения.

В формуле (1) коэффициент изгиба α для штампа был принят равным 1, площадь полушпалы ω была принята равной 0,125 м (площадь подошвы штампа), а расстояние между шпалами соответствует эпюре 1840 шт./км.

В формуле (2) ΔF является разницей между максимальной и минимальной нагрузкой, прикладываемой к штампу, а величина Δu была получена экспериментально и является разницей в перемещении штампа при минимальном и максимальном значениях прикладываемой силы.

На рис. 7 представлен график изменения модуля упругости пути для каждой модели, вычисленного по формуле (1) в течение всего эксперимента.

Из графика видно, что модель без подшпальной прокладки имеет модуль упругости близкий к 100 МПа, что согласуется с данными, приведенными в Методике² для железнодорожного пути на железобетонных шпалах. Анализируя график, можно сказать, что использование мягких прокладок уменьшает модуль упругости пути практически в два раза и приближает его к пути на деревянных шпалах, который считается оптимальным для взаимодействия пути и подвижного состава.

ВЫВОДЫ

Поставленный эксперимент подтвердил заявленную гипотезу о снижении остаточных осадок балластного слоя при применении ПШП. При этом после 2 млн циклов нагружений величина остаточной осадки балластного слоя уменьшилась в 1,5 раза при ПШП среднего типа и в 1,9 при ПШП мягкого типа.

Площадь контакта между подошвой железобетонного штампа и зернами щебня при применении ПШП возросла примерно в два раза, что во столько же раз снизило контактные напряжения на щебень и соответственно уменьшило риск его истирания.

Величина модуля упругости пути в эксперименте для модели без ПШП получена

близкой к величине аналогичного модуля, принимаемого в расчетах по Методике², что указывает на корректность результатов эксперимента.

Модуль упругости пути при применении ПШП мягкого типа снизился до величин модуля упругости деревянных шпал, который считается оптимальным для взаимодействия пути и подвижного состава.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

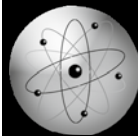
1. Кореньков Д. А., Иванников М. А., Загитов Э. Д. Требования к перспективным элементам инфраструктуры, ремонту и обслуживанию // Путь и путевое хозяйство. – 2023. – № 1. – С. 2–4. EDN: ALXGAR.
2. Попов С. Н. Балластный слой железнодорожного пути. – М.: Транспорт, 1965. – 183 с.
3. Лысюк В. С., Сазонов В. Н., Башкатова Л. В. Прочный и надежный железнодорожный путь. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 589 с. ISBN 5-94628-112-7.
4. Федулов В. Ф. О накоплении остаточных деформаций щебеночной призмы на пути с железобетонными шпалами: сборник научных трудов // ВНИИЖТ. – 1961. Вып. 217: Стабилизация щебеночного основания ж.д. пути. – С. 107–115.
5. Барабошин В. Ф., Ананьев Н. И. Повышение стабильности пути в зоне рельсового стыка. – М.: Транспорт, 1978. – 45 с.
6. Подшпальные прокладки в пути на балласте // Железные дороги мира. – 2011. – № 8. – С. 74–77. EDN: OKKJNX.
7. Шафрановский А. К. Выправка пути в заключительной стадии стабилизации щебеночной призмы // Тр. ВНИИЖТ. – 1961. – Вып. 217. – С. 71–98.
8. Желнин Г. Г., Кузнецов В. В. Снижение динамического воздействия на путь в стыках // Сб. научных трудов третьей научно-практ. конференции «Ресурсосберегающие технологии на железнодорожном транспорте». – М.: МИИТ, 2000. – С. 6–10.
9. Каплин В. Н. Текущее содержание пути в зоне рельсовых стыков на особо грузонапряженных линиях с применением упругих подшпальных прокладок // Дисс... канд. техн. наук. – М.: РУТ (МИИТ), 2022. – 126 с. [Электронный ресурс]: https://www.miit.ru/content/Текущее%20содержание%20пути%20на%20особо%20грузонапряженных%20линиях%20с%20применением%20упругих%20подшпальных%20прокладок.pdf?id_wm=901547&ysclid=m8q13sk2lj563484604. Доступ 28.09.2024.
10. Ашпиз Е. С. Мониторинг эксплуатируемого земляного полотна: Теоретические решения и практическое применение // Дисс. ... докт. техн. наук. – М.: МИИТ, 2002. – 396 с. EDN: NMEFJL.
11. Федоров В. И. Прогноз прочности и сжимаемости оснований из обломочно-глинистых грунтов. – М.: Стройиздат, 1988. – 128 с. ISBN 5-274-00107-6.
12. Альбрехт В. Г., Золотарский А. Ф. Современные конструкции верхнего строения пути. – М.: Транспорт, 1975. – 279 с.

Информация об авторах:

Дылёв Егор Олегович – аспирант кафедры пути и путевого хозяйства Российского университета транспорта, Москва, Россия, dylev.egor@mail.ru.

Ашпиз Евгений Самуилович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой пути и путевого хозяйства Российского университета транспорта, Москва, Россия, geonika@inbox.ru.

Статья поступила в редакцию 21.08.2024, одобрена после рецензирования 10.10.2024, принята к публикации 18.11.2024.



Алгоритм оцифровки технологических графиков обработки поездов на железнодорожных станциях



Живко ЯНЕВ



Никита ЛУГОВСКИЙ



Юрий ПАЗОЙСКИЙ



Сергей КАЛИНИН

**Живко Янев¹, Никита Владимирович Луговский²,
Юрий Ошарович Пазойский³, Сергей Владимирович Калинин⁴**

^{1, 3} Российский университет транспорт, Москва, Россия.

^{1, 2, 4} Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия.

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0856-341X>; РИНЦ SPIN-код: 8538-7511; РИНЦ AuthorID: 1092590.

³ РИНЦ SPIN-код: 5355-5945; РИНЦ AuthorID: 403168.

⁴ РИНЦ SPIN-код: 4957-2295; РИНЦ AuthorID: 1236784.

✉ ¹ zivkoacter@yahoo.com.

АННОТАЦИЯ

Изменяющиеся объемы перевозок грузов вызывают необходимость в ускоренном продвижении грузопотоков, в том числе за счет изменения технологии пропуска поездов по инфраструктуре железнодорожного транспорта. В таких условиях требуется создать цифровые модели, цель которых – воспроизвести работу оригинала. Полученные результаты работы цифровой модели послужат обоснованием для последующей разработки вариантов работы моделируемого объекта, направленных на выполнение перспективных показателей работы железнодорожного транспорта.

В связи с этим, в рамках проведенного исследования разработан алгоритм оцифровки технологических графиков

обработки поездов. Цель разработанного алгоритма – согласно его структуре сформировать программу, обеспечивающую оперативный автоматизированный учет технологии работы оригинальных объектов железнодорожного транспорта в условиях трансформации аналоговой информации в ее цифровой тип. Программным, структурным и системным методами был создан алгоритм, в основе которого – машинная модель обучения. Оценка точности определения подаваемой технологической операции оценивается чистотой информационного узла, а для эксперимента были оцифрованы более 120 технологических графиков обработки поездов различных железнодорожных станций.

Ключевые слова: цифровая модель железнодорожной станции, оцифрованный технологический график обработки поезда, стоп-слово, лемматизация, мультиклассовая классификация (случайный лес), векторизация текста, метод TF-IDF, коэффициент Джини.

Для цитирования: Янев Ж., Луговский Н. В., Пазойский Ю. О., Калинин С. В. Алгоритм оцифровки технологических графиков обработки поездов на железнодорожных станциях // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 13–21. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-2>.

**Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость в быстром обслуживании поездов, в том числе при переориентации объемов перевозок грузов, требует внесения корректировок в технологию работы железнодорожных станций [1]. В связи с этим, необходимо оперативно обосновывать корректность предлагаемых мероприятий по изменению конфигурации инфраструктуры или технологии работы железнодорожных станций. Это возможно путем создания цифровых моделей железнодорожных станций, состоящих из блока цифровой инфраструктурной модели железнодорожной станции и блока, описывающего технологию обработки поездов и включенных в него ресурсных элементов. Подробная структура цифровой модели железнодорожной станции представлена в работе [2]. Предложенные блоки должны обеспечить высокий уровень идентичности поведения оригинала в виртуальном мире, который за счет создания цифровых инфраструктурных моделей и оцифрованных технологических графиков обработки поездов позволит в ускоренном или оперативном режиме проводить планирование и организацию работы железнодорожных станций, что является весьма актуальной задачей, стоящей перед железнодорожным транспортом, особенно в России.

В работах [3; 4] дается определение цифровой модели (цифрового двойника¹) железнодорожной станции, согласно которому цифровые модели в целом предназначены для моделирования поведения оригинала в условиях изменяющихся исходных величин и технологии работы.

Цифровые модели железнодорожной станции также могут быть использованы для разработки сценариев поведения объектов в рамках оперативного управления железнодорожным транспортом. Авторы в работах [5–7] пришли к выводу, что информационная база технологических параметров должна включать технологические нормативы работы железнодорожных станций для последующего оперативного прогнозирования.

В работе [8] авторы приводят перечень департаментов компании ОАО «РЖД», в которых в первую очередь подлежат внедрению и использованию цифровые и квантовые

инструменты в целях улучшения сервиса клиентов посредством повышения уровня принятия оперативных решений. В исследовании отмечается важность использования цифровых модулей в процессе планирования работы станции, что подтверждает актуальность разработки модуля по оцифровке технологического графика обработки поездов.

Для моделирования поведения существующей железнодорожной станции (оригинала) в условиях постоянного изменения исходных величин и технологии работы требуется максимально оперативное внесение корректировок в технологические графики обработки поездов.

Ввиду этого *целью* данного исследования является разработка порядка действий по оцифровке технологических графиков обработки поездов с минимальными временными потерями в автоматизированном виде.

Предлагаемый алгоритм должен обладать универсальностью для последующего использования на этапах подготовки масштабных концепций и проектов по цифровой трансформации компаний [9].

С помощью *структурного подхода* была описана архитектура алгоритма оцифровки технологических графиков обработки поездов, а также его содержательная часть, состоящая из пяти основных блоков: загрузки исходной информации, байтовой трансформации, лемматизации, векторизации и выдачи готового оцифрованного технологического графика обработки поездов.

Системный подход позволил сформировать перечень требований, предъявляемых к разработанному алгоритму.

Методом программирования блоки наделены необходимой функциональностью, а также проведен ряд экспериментов по оцифровке с использованием разработанной программы соответствующих технологических графиков обработки поездов. По результатам работы программы оценивается чистота информационного узла, формируются цифровые технологические цепочки, последние загружаются в программу многоуровневой системы управления для последующего моделирования работы железнодорожной станции.

При внесении корректировок или описании технологии работы существующих или вновь созданных цифровых моделей железнодорожных станций технологам-модел-

¹ Цифровые двойники РЖД. Как используют цифровой двойник на российских железных дорогах [Электронный ресурс]: <https://twins.rzddigital.ru/twins>.

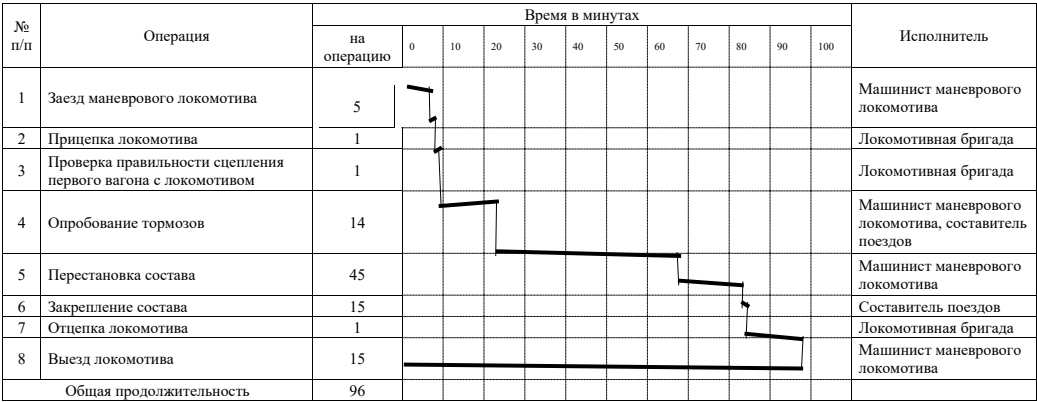


Рис. 1. Пример технологического графика обработки поезда [выполнено авторами].

лерам² требуется от нескольких часов до нескольких суток для воссоздания технологического поведения реальной железнодорожной станции. В связи с этим, в данной статье предложен алгоритм формирования и трансформации технологических графиков обработки поездов в их цифровой тип. В результате работы алгоритма будет получен оцифрованный технологический график обработки поезда³.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На входе вводится исходный файл, в котором изложены технологические графики обработки поезда (рис. 1).

Технологические графики обработки поездов приведены в нормативных документах каждой железнодорожной станции (техпроцесс, техкарта). Они могут быть представлены в виде рисунка, графика или таблицы с указанием продолжительности и очередности выполнения соответствующих операций.

Программа, разрабатываемая согласно предложенному алгоритму (рис. 2), должна обладать следующим функционалом:

- распознавать получаемую информацию двух типов (текст и изображение);

² Технолог-моделлер – сотрудник, имеющий компетенции и навыки в области организации работы железных дорог, опыт создания цифровых моделей железнодорожных объектов, общий стаж работы которого не менее двух лет. – прим. авт.

³ Оцифрованный технологический график обработки поезда – цифровой двойник аналогового технологического графика обработки поезда, полученный в результате работы специализированного алгоритма, учитывающего нормативную продолжительность и очередность выполнения операций с поездом или иными объектами на железнодорожной станции. – прим. авт.

- преобразовывать полученный тип информации в байтовый формат;
- обрабатывать текстовые предложения и изображения для обучения модели машинного обучения;
- векторизовать текст с помощью метода TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency; выбор метода TF-IDF объясняется тем, что, например, метод Word2vec больше подходит для векторизации текста в нейронных сетях, а также по причинам, описанным ниже);
- создавать оцифрованный технологический график обработки поезда.

После ввода исходной информации в виде текста или изображения по предложенному на рис. 2 алгоритму производится отбор нужной информации путем удаления стоп-слов⁴ из предложения. После очистки обрабатываемого текста от стоп-слов, предложенный алгоритм запускает механизм лемматизации⁵ [11].

Алгоритм оцифровки технологического графика обработки поезда работает на программе, написанной с помощью языка программирования Python.

Для распознавания информации, получаемой из технологического графика обработки поезда, алгоритм должен включать две функции:

- функция чтения данных из текста – если технологический график представлен в виде таблицы или документа с текстом, то

⁴ Стоп-слово – это ненужное для алгоритма векторизации текста слово в виде предлога, союза, частицы и т.п., создающее избыточность информации в информационной среде [10] – прим. авт.

⁵ Лемматизация – это процесс приведения всех изменяемых форм слова к единому значению, снижающий вариативность одного и того же слова для повышения качества анализа текста. – прим. авт.



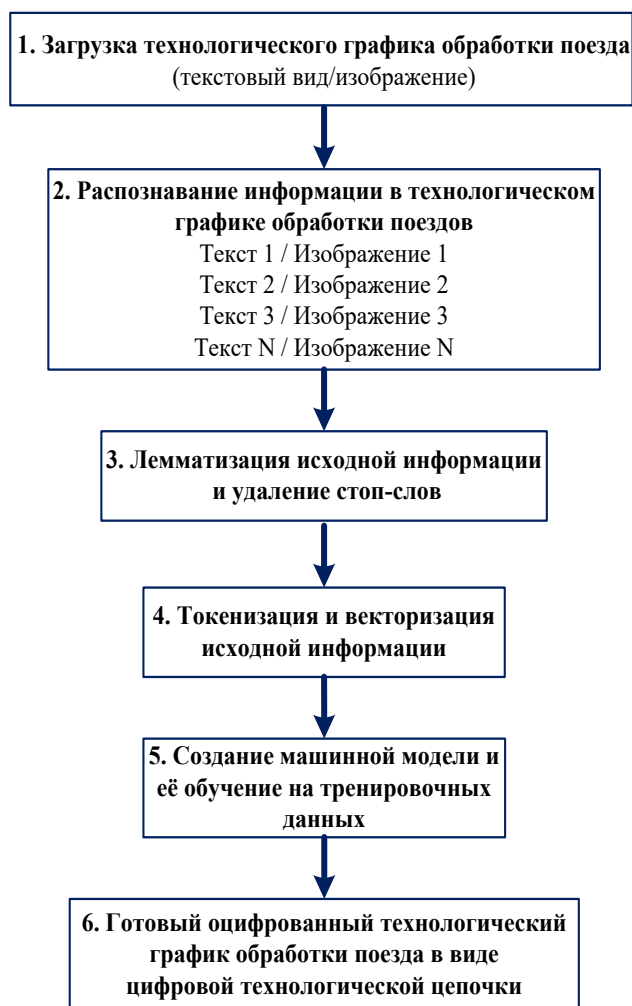


Рис. 2. Алгоритм оцифровки технологического графика обработки поезда [выполнено авторами].

```

def read_tables_from_docx(docx_file):
    # Load the Word document
    doc = Document(docx_file)

    all_tables = []

    # Iterate through all tables in the document
    for table in doc.tables:
        table_data = []

        # Iterate through each row in the table
        for row in table.rows:
            row_data = []

            # Iterate through each cell in the row
            for cell in row.cells:
                # Get the text in each cell and append to row_data
                row_data.append(cell.text)

            # Append the row data to table_data
            table_data.append(row_data)

        # Append the table data to all_tables
        all_tables.append(table_data)

    return all_tables
  
```

Рис. 3. Фрагмент функции чтения данных из текста технологического графика обработки поезда аналогового формата [выполнено авторами].

```
def extract_images_from_docx(docx_file):
    doc = Document(docx_file)
    images = []

    for s in doc.inline_shapes:
        blib = s._inline_graphic.graphicData.pic.blipFill.blip
        rId = blib.embed
        document_part = doc.part
        image_part = document_part.related_parts[rId]
        image_bytes = image_part.blob
        images.append(image_bytes)

    return images
```

Рис. 4. Фрагмент функции чтения данных из рисунка технологического графика обработки поезда [выполнено авторами].

функция принимает вид, представленный на рис. 3;

– функция чтения данных из изображения – если технологический график представлен в виде изображения или растровой графики, то функция принимает вид, представленный на рис. 4.

После восприятия информации программой из двух типов источников (текст или рисунок) запускается подсистема преобразования соответствующей информации в байтовый вид, как это представлено на рис. 5.

На успешную безошибочную работу предложенного алгоритма обработки текста влияет токенизация и векторизация текста [12]. Токенизация производится в целях

разделения названия технологической операции на отдельные слова с сохранением порядка их расположения. Векторизация текста необходима для обеспечения высокой степени восприятия подаваемой информации моделью машинного обучения. Метод TF-IDF [13; 14] был выбран по ряду причин, так как он:

- учитывает важность слова в контексте документа;
- выявляет ключевые слова;
- устраняет часто встречающиеся слова;
- хорошо масштабируется (может применяться к большим корпусам текстов).

Векторизация произведена с применением метода TF-IDF согласно формуле (1):

№ п/п	Название операции	Продолжительность операции	Цифровой знак
1	Заезд маневрового локомотива	5	...
2	Прицепка маневрового локомотива	1	...
3	Проверка правильности сцепления первого вагона с маневровым локомотивом	1	...
4	Опробование тормозов	14	...
N

Рис. 5. Пример (фрагмент) трансформации соответствующей технологической операции в байтовый вид [выполнено авторами].



11.3 rows × 100 columns

Рис. 6. Результаты токенизации и векторизации текста технологического графика обработки поезда [выполнено авторами].

(1)

где $w_{x,y}$ — ценность слов;

$f_{x,y}$ – доля повторений слова x в одном предложении по отношению к общему числу таких слов x во всех предложениях;

N – количество предложений в выборке;
 df_x – количество предложений из общей выборки, содержащих слово x .

Векторизация текста – это преобразование токенов в числа. Данное действие необходимо для дальнейшего обучения, дообучения и кор-

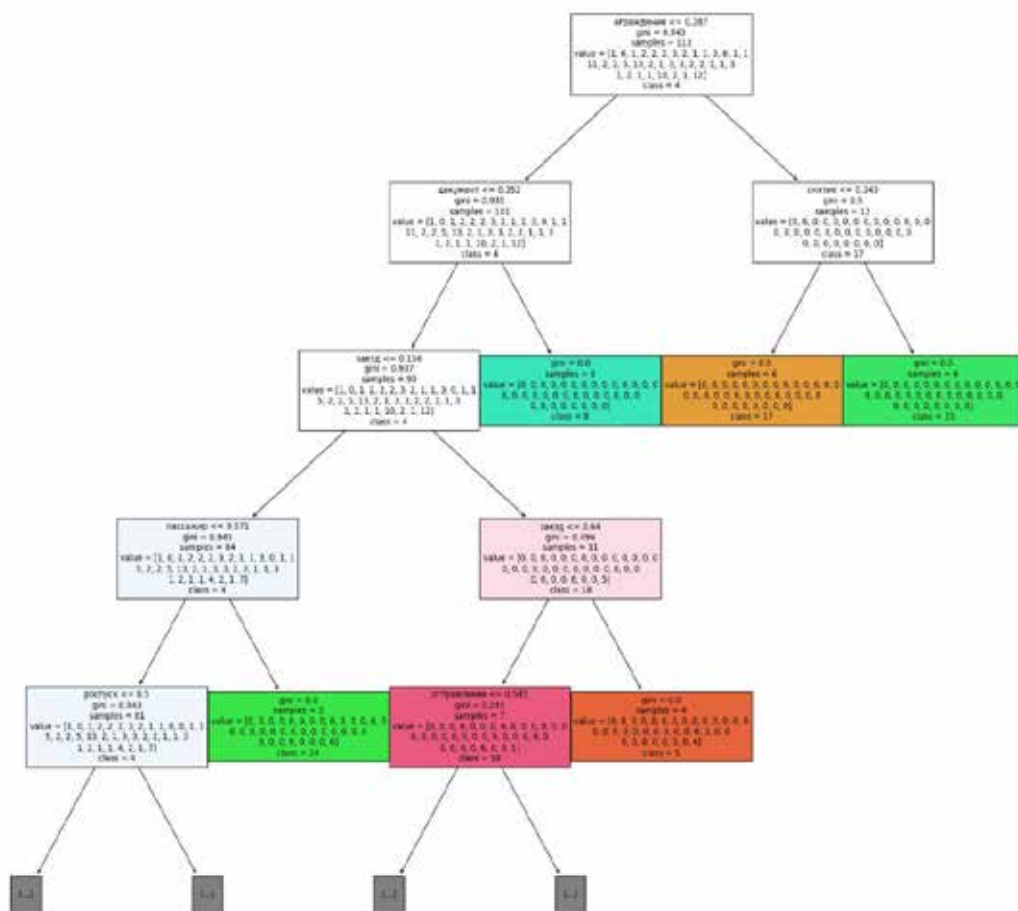


Рис. 7. Структура модели машинного обучения с использованием мультиклассовой классификации («случайный лес»)
[выполнено авторами].

```

parameters={'max_depth': [2,5,7,10], 'n_estimators': [10,50,100], 'min_samples_split': [10,20,30], 'min_samples_leaf': [10,20,30]}

scoring = {'accuracy': 'accuracy',
           'precision': 'precision_macro',
           'recall': 'recall_macro',
           'f1': 'f1_macro'}

clf = RandomForestClassifier()

grid_search_cv_clf=GridSearchCV(clf, parameters, cv=5,scoring = scoring,refit='accuracy')#добавляем еще кросс-валидацию с пятью ф
grid_search_cv_clf.fit(vectorize_text, numeric_labels)
best_params = grid_search_cv_clf.best_params_

```

Рис. 8. Перечень параметров, показывающих точность машинной модели обучения [выполнено авторами].

ректировки работы алгоритма в процессе работы модели машинного обучения.

После успешной токенизации и векторизации текста, технологический график обработки поезда из рис. 5 принимает вид, представленный на рис. 6.

Получить корректный результат работы модели машинного обучения возможно при обработке большого количества тренировочных данных. Поэтому следует выбрать соответствующую модель машинного обучения, которая поможет сформировать набор навыков, компетенций и знаний, направленных на изготовление оцифрованного технологического графика обработки поезда.

Тренировка модели машинного обучения в рамках данного исследования проводилась с использованием мультиклассовой классификации («случайный лес»), которая обеспечивает хорошую обработку больших данных, устойчивость переобучения и работу с разнообразными данными. Структура модели машинного обучения представлена на рис. 7.

В предложенной структуре модели машинного обучения мультиклассовой классификацией был использован параметр «Gini impurity» (коэффициент или показатель неоднородности (неопределенности) Джини) [15; 16]. Он измеряет вероятность того, что случайно выбранный элемент из множества будет неправильно классифицирован, если он был случайно помечен в соответствии с распределением меток в узле. Для узла с множеством элементов, принадлежащих к различным классам, «Gini impurity» вычисляется следующим образом: Если все элементы в узле принадлежат к одному классу, «Gini impurity» будет равен 0, что указывает на лучшую возможную чистоту узла. Если же элементы равномерно распределены по различ-

ным классам, «Gini impurity» будет близок к 0,5, что указывает на максимальную неопределенность или разнородность чистоты узла [15; 16].

Точность модели машинного обучения по оцифровке технологического графика обработки поезда может быть сформирована на основании параметров (глубина деревьев, количество деревьев, минимальное количество выборок и минимальное количество листов разделения), приведенных на рис. 8.

ВЫВОДЫ

В результате работы модели машинного обучения были проведены 127 экспериментов по оцифровке технологических графиков обработки поездов. На рис. 9 представлены итоговые параметры оценки качества модели машинного обучения по оцифровке технологического графика обработки поезда.

Оценка точности модели машинного обучения по оцифровке технологического графика обработки поезда на тренировочных данных приведена на рис. 10 и составила 0,938 у.е., что соответствует высокому уровню точности определения, восприятия и преобразования получаемой информации.

В результате работы предложенного алгоритма получен оцифрованный технологический график обработки поездов в виде цифровой технологической цепочки, использующейся в процессе моделирования работы железнодорожной станции (рис. 11).

Предложенный алгоритм оцифровки технологического графика обработки поезда может быть использован для:

– обработки и передачи приказов, распоряжений и телеграмм на борт локомотива, а также диспетчерскому персоналу (предложенный алгоритм по переработке аналоговой информации универсальный, поэтому позво-



```
best_params
{'max_depth': 5,
 'min_samples_leaf': 10,
 'min_samples_split': 10,
 'n_estimators': 100}
```

Рис. 9. Численные значения параметров модели, обеспечивших наилучшие значения метрик точности в проведенных опытах [выполнено авторами].

```
accuracy_score(clf.predict(vectorize_text), numeric_labels)
0.9380530973451328
```

Рис. 10. Оценка точности искусственного интеллекта модели машинного обучения по оцифровке технологического графика обработки поезда [выполнено авторами].



Рис. 11. Пример цифровой технологической цепочки [выполнено авторами].

ляет оцифровать документы, обеспечивающие заблаговременное предупреждение поезда бригады о предстоящих внештатных ограничениях, влияющих на ходовую скорость поезда);

– разработки технологических графиков обработки поездов на железнодорожных станциях необщего пользования (технологические графики обработки поездов на железнодорожных станциях необщего пользования хранятся в аналоговом виде. На этапе описания технологии работы таких объектов требуется создавать цифровые технологические

цепочки вручную. Данный процесс занимает по времени от одной недели до двух месяцев, в зависимости от масштабности моделируемого объекта. Сокращение временных затрат на описание технологии работы в этом случае будет достигнуто с использованием предложенного алгоритма и программного модуля по оцифровке технологических графиков обработки поездов);

– формирования технологических цепочек обработки поездов в рамках проектов создания «цифровых железнодорожных станций» (многовариантный режим работы объекта

в процессе моделирования требует оперативного изменения временных норм по выполнению технологических графиков. Изменение технологических графиков обработки поездов, а также вписанных временных норм может быть выполнено с использованием предложенного программного модуля и алгоритма).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чигрин Н. С., Борисенков Е. С., Грешенштейн А. П. Характеристика проблем перевозок грузов железнодорожным транспортом в восточном направлении // Техника и технология транспорта. – 2023. – № 4 (31). EDN: ZKCSJKE.

2. Янев Ж. О структуре цифровой модели железнодорожной станции // Транспортное дело России. – 2024. – № 3. – С. 186–190. EDN: OJZHAY.

3. Костенко В. В., Богданович Д. Е. Практическое применение цифровой модели для технико-экономического обоснования реконструкции железнодорожной станции // Бюллетень результатов научных исследований. – 2021. – № 1. – С. 61–73. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-1-61-73.

4. Головнич А. К. Детерминация понятия «цифровой двойник» в 3SD-моделях железнодорожных станций // Техник транспорта: образование и практика. – 2023. – № 4 (2). – С. 184–192. DOI: <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2023.2.184-192>.

5. Ерофеев А. А. Нормативно-справочная информация в системе поездообразования // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. – 2007. – № 1–2 (14–15). – С. 54–59. EDN: YSDPLF.

6. Лысыков М. Г., Олышанский А. М., Розенберг Е. Н., Розенберг И. Н. Патент № 2723051 С1 Российская Федерация, МПК B61B 1/00. Система оперативного управления движением транзитных поездов: № 2019131595: заявл. 08.10.2019: опубл. 08.06.2020 / заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте». EDN: UTJFTN.

7. Костенко О. А., Пархоменко Н. В. Принципы построения программной цифровой модели сортировочной станции и ее исследование на ЭЦВМ // Кибернетика и транспорт. – М.: Наука, 1967. – С. 118–133.

8. Khomonenko, A., Khalil, M. M. Quantum computing in controlling railroads. In: E3S Web of Conferences: International Scientific Conference Transport Technologies

in the 21st Century (TT21C-2023) «Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution», Rostov-on-Don, Russia, 05-07.04.2023, Vol. 383. A. Bieliatynskiy and A. N. Guda (Eds.). – Rostov-on-Don, Russia: EDP Sciences, 2023. – с. 01010. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338301010>.

9. Lakemond, N., Holmberg, G., Pettersson A. Digital Transformation in Complex Systems. IEEE Transactions on Engineering Management, 2024, Vol. 71, pp. 192–204. DOI: 10.1109/tem.2021.3118203.

10. Потюпкин А. Ю., Чечкин А. В. Искусственный интеллект на базе информационно-системной избыточности. – М.: ООО «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2019. – 384 с. ISBN 978-5-907064-44-7.

11. Жердева М. В., Артюшенко В. М. Стемминг и лемматизация в lucene.net // Вестник Московского государственного университета леса. – Лесной вестник. – 2016. – Т. 20. – № 3. – С. 131–134. EDN: WKNMTN.

12. Челышев Э. А., Оцоков Ш. А., Раскатова М. В., Щеголев П. Сравнение методов классификации русскоязычных новостных текстов с использованием алгоритмов машинного обучения // Вестник кибернетики. – 2022. – № 1 (45). – С. 63–71. DOI: 10.34822/1999-7604-2022-1-63-71.

13. Оськина К. А. Оптимизация метода классификации текстов, основанного на TF-IDF, за счет введения дополнительных коэффициентов // Вестник Московского государственного лингвистического университета. Гуманитарные науки. – 2016. – № 15 (754). – С. 175–187. EDN: OPWIAU.

14. Полякова А. С., Липинский Л. В., Поплаухина М. А. [и др.] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021681722 Российская Федерация. Интеллектуальная система для решения задач анализа естественного языка на основе процедуры векторизации текста с помощью моделей машинного обучения, генетического алгоритма и метода TF-IDF: № 2021681149: заявл. 17.12.2021: опубл. 24.12.2021; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева». EDN: GVNFKK.

15. Disha, R. A., Waheed, S. Performance analysis of machine learning models for intrusion detection system using Gini Impurity-based Weighted Random Forest (GIWRF) feature selection technique. Cybersecurity, 2022, Vol. 5, Iss. 1, pp. 1–22. DOI: 10.1186/s42400-021-00103-8.

16. Demetriou, D., Michailides, C., Onoufriou, T., Papanastasiou, G. Coastal zone significant wave height prediction by supervised machine learning classification algorithms. Ocean Engineering, 2021, Vol. 221, art. 108592. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108592. ●

Информация об авторах:

Янев Живко – старший преподаватель кафедры железнодорожных станций и транспортных узлов Российского университета транспорта; главный специалист по имитационному моделированию Научно-технического комплекса цифрового моделирования (НТК ЦМ) им. В. И. Уманского Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия, zivkoacter@yahoo.com.

Луговский Никита Владимирович – аналитик Научно-технического комплекса цифрового моделирования (НТК ЦМ) им. В. И. Уманского Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия, lnvlnikit@gmail.com.

Пазойский Юрий Ошарович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железнодорожных станций и транспортных узлов Российского университета транспорта, Москва, Россия, razoyskiy@mail.ru.

Калинин Сергей Владимирович – заместитель начальника Научно-технического комплекса цифрового моделирования (НТК ЦМ) им. В. И. Уманского Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Россия, hart82@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 29.03.2024, одобрена после рецензирования 10.09.2024, принята к публикации 08.10.2024.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 625.1
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-3>

Улучшение показателей качества шпинтонов путем изменения технологических решений при их изготовлении



Татьяна ПОПОВА



Владимир ФЕДИН



Александр ПОПОВ

Татьяна Александровна Попова¹, Владимир Михайлович Федин², Александр Петрович Попов³

^{1,2,3} Российский университет транспорта, Москва, Россия,

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6620-2292>; Scopus Author ID: 57215115792; РИНЦ SPIN-код: 8517-7756; РИНЦ AuthorID: 706166.

³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4618-4154>; Scopus Author ID: 57215127911; РИНЦ SPIN-код: 5652-9525; РИНЦ AuthorID: 705561.

✉ ¹ tatiana241187@gmail.com.

✉ ² vmfedin@yandex.ru

✉ ³ pap60@bk.ru.

АННОТАЦИЯ

Обеспечение надежности подвески вагонов метрополитена напрямую определяется деталями, входящими в комплекс системы надбуксового подвешивания.

В данной работе рассматривается шпинтонная подвеска. Шпинтон представляет собой круглый стальной стержень, который крепится через втулку к балке тележки своей верхней частью, в то время как его нижний конец вставляется в проушину буксы. Центральная секция шпинтона служит своеобразной направляющей для пружин подвешивания.

Принцип работы основывается на способности шпинтонов распределять нагрузки, возникающие в процессе движения поезда метрополитена. Эта технология позволяет значительно уменьшить износ рельсов и колесных пар, увеличивая тем самым безопасность и снижая расходы на техническое обслуживание подвижного состава.

Ключевые слова: метрополитен, шпинтон, надбуксовое подвешивание, упрочнение деталей, термообработка, закалка стали, сталь 40Х, сталь 35.

На сегодняшний день существует ряд проблем, вызванных отказами шпинтонов, срок службы которых не согласуется по временным параметрам с отказами рам вагонных тележек. Помимо прочего, большое количество изделий отбраковывается на этапе производственных испытаний, что вызвано наличием внутренних дефектов. Так как вопросы надежности стоят наиболее остро, крайне актуально найти способы повышения долговечности шпинтонного узла. Данное исследование направлено на поиск оптимальных технологических решений для изготовления деталей. Проведен анализ материала и возможных методик обработки шпинтонов.

В результате сделан вывод о перспективности закалочного охлаждения быстро движущимся потоком воды, так как в ходе проведенных исследований доказано достижение всех требуемых параметров.

Для цитирования: Попова Т. А., Федин В. М., Попов А. П. Улучшение показателей качества шпинтонов путем изменения технологических решений при их изготовлении // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 22–26. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-3>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В конструкции российских вагонов метророполитена широко использовались поводковая система подвешивания и шпинтонная, из которых более оптимальной, с точки зрения обеспечения надежности, является шпинтонная система подвешивания. Данный узел используется для обеспечения стабильности и комфорта в вагонах. Непосредственно шпинтон является центральным элементом гасителя колебаний, который в свою очередь представляет собой механизм, предназначенный для снижения амплитуды вертикальных перемещений кузова, возникающих в процессе движения вагонов, и работающий в тандеме с пружинами рессорного подвешивания. Суть работы шпинтона заключается в создании диссипативных (рассеивающих) сил, которые активируются при взаимодействии с пружинами для эффективного гашения колебаний. Схема шпинтона представлена на рис. 1.

В процессе эксплуатации шпинтон подвергается воздействию большого спектра нагрузок – как динамических, так и статических. Это обстоятельство подчеркивает важность задачи определения его надежности и долговечности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ материала детали шпинтон

На начальных этапах применения тележек шпинтонного типа выявилась проблема возникновения усталостных трещин в зоне пересечения кольцевых швов сварки втулок внутренних шпинтонов с продольными швами продольных балок. Это приводило к негативным последствиям. Благодаря ряду конструктивно-технологических мероприятий, таким как приварка специальной накладки на верхней полке в зоне сварки втулки и двусторонняя разделка кромок под кольцевой шов, удалось лишь частично решить данную проблему.

Новые методы обработки и исследования материалов позволяют разработать эффективные технические и технологические решения для предотвращения дальнейших повреждений и обеспечения безопасной эксплуатации тележек.

Большинство шпинтонов на сегодняшний день изготавливается согласно требованиям конструкторской документации из стали

марки 40Х. Этот материал, отвечающий ГОСТ 4543, обогащен хромом в диапазоне 0,78...1,15 %, что обеспечивает изделию высокую надежность по эксплуатационным характеристикам [1]. Данный вид конструкционной стали относится к категории лучших благодаря своей устойчивости к повреждению и долговечности, хотя и сопряжен с высокой стоимостью. Несмотря на это, значительное число шпинтонов подлежит отбраковке из-за наличия неметаллических включений. Они представляют собой дефекты исходного металла, которые могут проявить себя как на поверхности, так и в подповерхностном слое изделия [2]. Такие дефекты определяются с использованием магнитного метода неразрушающего контроля. Следует отметить, что даже высококачественные стали могут содержать неметаллические включения, что не исключает их использование в производстве, но требует внимательного контроля.

Для повышения экономической эффективности предлагаются альтернативные решения, включающие замену исходного материала на аналогичный по своим характеристикам. Рассматривается сталь, которая обладает сравнимыми физическими свойствами. С целью оптимизации выбора материала осуществляется анализ и сравнение всех предложенных альтернатив по ряду критериев, включая стоимость, доступность и соответствие техническим требованиям производства¹. Такой подход позволяет не только гарантировать высокое качество конечного продукта, но и обеспечить экономическую эффективность производственного процесса.

При окончательном выборе материалов учитываются условия эксплуатации и внешние факторы, такие как механические нагрузки и влияние внешней среды [3]. В случае необходимости прорабатываются вопросы улучшения механических свойств деталей путем ввода дополнительной упрочняющей обработки².

Рассматриваются несколько подходящих материалов: углеродистые стали – сталь 35, сталь 45 и сталь 47ГТ.

¹ Рекомендации по применению низколегированных высокопрочных сталей для сварных конструкций: отчет о НИР / Институт электросварки им. Е. О. Патона. – Киев, 1977. – 77 с.

² ГОСТ 1050-2013Metalloпродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей.



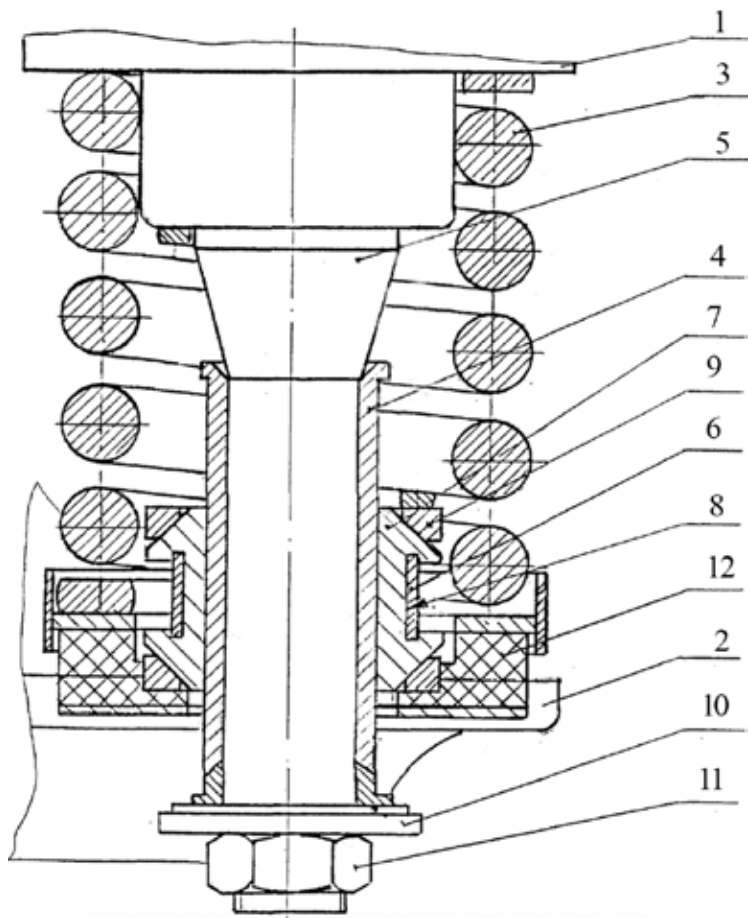


Рис. 1. Шпигонный узел вагона метрополитена: 1 – защитный колпак; 2 – резиновая прокладка; 3 – нижняя опора пружины; 4 – пластмассовая втулка; 5 – крепежная проволока; 6 – пружина; 7 – верхняя направляющая опора; 8 – шпигтон; 9 – стопорная планка; 10 – винт; 11 – фиксирующая гайка; 12 – защитный кожух; 13 – гайка; 14 – нижняя опора пружины; 15 – резиновая втулка; 16 – стяжной хомут³.

Проведение сравнительного анализа состава металлов позволяет понять их механические свойства и способность к обработке. Кроме того, это помогает оптимизировать процессы производства и улучшить качество

готовой продукции. Анализ химического состава материала стали марки 40X, представлен в таблице 1.

Анализ результатов, приведенных в таблице 1, показывает соответствие действительного состава стали 40X требованиям ГОСТ 4543.

Альтернативным материалом для изготовления шпигтонов рассматривается сталь 35. Она относится к среднеуглеродистым сталям, которые применяют после нормализации, улучшения и поверхностной заковки для

³ Савинов С. Ю. Патент RU 16722 U1. Российская Федерация, Гаситель резонансных колебаний, № 2000119297/20, заявл. 15.02.2000: опубл. 02.10.2001 / Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральное конструкторское бюро транспортного машиностроения». – 8 с. [Электронный ресурс]: https://patents.s3.yandex.net/RU16722U1_20010210.pdf. Доступ 10.10.2020.

Таблица 1
Химический состав шпигтона из стали 40X [составлена авторами]

Объект исследования	Элемент, массовая доля, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Шпигтон, сталь 40X	0,42	0,23	0,67	0,001	0,005	1,05	0,09	0,05
Требования ГОСТ 4543-71	0,35–0,45	0,15–0,39	0,48–0,82	не более		0,78–1,15	не более	
				0,035	0,035		0,30	0,30

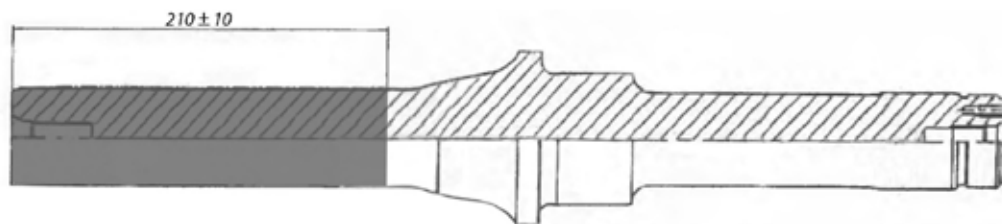


Рис. 2. Схема зоны «210» шпинтона [выполнена авторами].

разнообразных деталей машин [4]. Химический состав стали 35 приведен в таблице 2.

Анализ результатов исследования стали 35, представленных в таблице 2, позволяет убедиться в соответствии ее химического состава стандартам ГОСТ 1050.

Выбор в пользу стали 35 основывается на ряде преимуществ перед другими материалами-аналогами: изделия из нее выдерживают высокие ударные нагрузки. Для материала характерно отсутствие склонности к образованию трещин. Помимо всего прочего, для стали 35 характерно сочетание невысокой пластичности с твердостью. Среди преимуществ также можно назвать стоимостные характеристики: простота производственного процесса сказывается на относительно невысокой цене изделия. Также нет необходимости внедрять дорогостоящие легирующие добавки. Для стали 35 характерен достаточно широкий температурный диапазон применения от -40 до $+425^{\circ}\text{C}$.

Модернизация и оптимизация технологии изготовления шпинтона

Обработка деталей требует тщательно подобранных методик для достижения оптимальных свойств изделий⁴. Наиболее рациональный технологический процесс обработки шпинтонов складывается из следующих этапов: заготовка, полученная штамповкой, нормализация, дробеочистка, которая обеспечивает удаление заусенцев и других повер-

ностных дефектов [5]. Следующим этапом проводится механическая обработка для точной отделки формы и размеров детали. Далее – термическая обработка, включающая нагрев, закалочное охлаждение и отпуск.

В базовом варианте для устранения закалочных трещин на шпинтоне из стали 40X необходимо проводить одновременное интенсивное закалочное охлаждение с отводом тепла от всех частей детали [6–8]. Закалочная среда – масло. Для решения проблемы экологической чистоты производства, которая будет становиться все более актуальной с течением времени, предлагается заменить закалочную среду масла на воду. Это позволит снизить негативное воздействие на окружающую среду. Используется быстродвижущийся поток воды для охлаждения материала с учетом скорости потока, давления и температуры для достижения желаемых характеристик закаленного изделия [9].

Показателем качества является обеспечение равномерной твердости по всему периметру изделия без необходимости прибегать к дополнительным операциям, таким как индукционный нагрев [10; 11].

Анализ эксплуатационных повреждений шпинтона, изготовленного из стали 40X, показывает, что наиболее часто повреждение происходит в зоне «210» (см. рис. 2), что вызвано изменением прочностных свойств металла на участке перехода от высокопрочной зоны, закаленной индукционным способом, к зоне с улучшенной структурой.

Таблица 2

Химический состав шпинтона из стали 35 [составлена авторами]

Объект исследования	Элемент, массовая доля, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Шпинтон, сталь 35	0,33	0,24	0,62	0,001	0,005	0,11	0,09	0,06
Требования ГОСТ 1050-2013	0,31–0,41	0,15–0,39	0,47–0,83	не более				
				0,040	0,035	0,25	0,30	0,30
Шпинтон, сталь 35 (селект)	0,38–0,41	0,35–0,39	0,79–0,83	не более		0,21–0,25	0,25–0,30	Не более 0,30
				0,040	0,035			

⁴ ГОСТ 2999-75 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. – Введ. 1976.01.07. – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1975. – 31 с.





При испытании шпинтонов для оценки качества изделий необходимо проводить оценку твердости, механических свойств по сечению деталей, ударной вязкости и металлографические исследования.

При подборе оптимальных режимов температурного воздействия (влияние продолжительности воздействия и температуры на качественные параметры изделий показано в работах [12–14]) в процессе закалки быстро движущимся потоком воды и дальнейшего отпуска можно достичь равномерной твердости по всему сечению шпинтона на уровне 45–50 HRC.

ВЫВОДЫ

Шпинтонные системы подвешивания являются важным техническим решением в области железнодорожной техники и подвижного состава метрополитена. Разработка новых подходов к технологии закалочного охлаждения при изготовлении шпинтонов важна для повышения надежности и долговечности продукции. Предложенная технология закалочного охлаждения быстро движущимся потоком воды предполагает следующие преимущества:

- улучшение экологической обстановки за счет перехода от закалки в масле к воде;
- снижение себестоимости деталей при использовании стали 35 вместо 40Х.

Таким образом, новый технологический процесс производства шпинтонов не только позволит повысить качество и точность изготавливаемых деталей, но и будет выгоден с точки зрения экономической эффективности и экологической безопасности, что в свою очередь обеспечит высокую степень комфорта и безопасность пассажирских перевозок, а также откроет новые перспективы для разработки и совершенствования метропоздов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Баранов И. В., Ермолин Ю. А., Рева В. Ф. Некоторые вопросы конструирования и технологии изготовле-

ния элементов и узлов рам тележек подвижного состава, связанные с повышением усталостной прочности // Труды МИИТ. – 1968. – Вып. 296. – С. 3–20.

2. Гушин А. Н., Гусев Ю. Б., Созинов С. В. Поведение малоуглеродистой предварительно деформированной стали при статическом и циклическом нагружении // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2013. – № 5 (102). – С. 168–176. [Электронный ресурс]: <https://www.nntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2013/05/2013-05pdf> [полный текст выпуска]. Доступ 28.03.2024.

3. Bhadeshia, H. K. D. H., Honeycombe, R. W. K. Steels: Microstructure and Properties. 4th ed., 2017. ISBN 978-0-08-100270-4.

4. Пикеринг Ф. Б. Физическое металловедение и разработка сталей. – М.: Металлургия, 1982. – 184с.

5. Зайдес С. А., Ву Ван Гюн, Доан Тхань Ван. Разработка установки для повышения поверхностной твердости цилиндрических деталей // iPolytech Journal. – 2020. – Т. 24. – № 2. – С. 262–274. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-262-274>.

6. Wang, Li, Speer, J. G. Quenching and Partitioning Steel Heat Treatment. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2013, Vol. 2, pp. 268–281. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13632-013-0082-8>.

7. Inoue, T., Raniecki, B. Determination of thermal-hardening stress in steels by use of thermoplasticity theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1978, Vol. 26, Iss 3, pp. 187–212. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(78\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0022-5096(78)90008-X).

8. Шепеляковский К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. – М.: Машиностроение, 1972. – 288 с.

9. Кузнецова Н. Ю. Исследование охлаждающей способности потока быстро движущейся воды при объемно-поверхностной закалке стали // XI Международная научно-техническая уральская школа-семинар молодых ученых-металловедов. – Екатеринбург, 2010. – С. 43–45.

10. Колмогоров Г. Л., Кузнецова Е. В., Тиунов В. В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий: Монография. – Пермь: Изд-во Пермского нац. исслед. политехнического ун-та, 2012. – 226 с. ISBN: 978–5–398–00840–1.

11. Хворостухин Л. А., Шишкин С. В., Ковалев А. П. [и др.]. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.

12. Кобаско Н. И., Прохоренко Н. И. Влияние скорости охлаждения при закалке на образование трещин в стали 45 // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1964. – № 2. – С. 53–54.

13. Wu, B. W., Chen, G. X., Lv, J. Z., Zhu, Q., Zhao, X. N., Kang, X. Effect of the axlebox arrangement of the bogie and the primary suspension parameters on the rail corrugation at the sharp curve metro track. *Wear*, Vol. 426–427, Part B, 2019, pp 1828–1836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.038>.

14. Iwnicki, S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics (1st ed.). CRC Press. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420004892>. ISBN 13: 978-0-8493-3321-7. [Доступ для подписчиков].

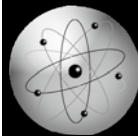
Информация об авторах:

Попова Татьяна Александровна – старший преподаватель кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Российского университета транспорта, Москва, Россия, tatiana241187@gmail.com.

Федин Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Российского университета транспорта, Москва, Россия, vmfedin@yandex.ru

Попов Александр Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава Российского университета транспорта, Москва, Россия, par60@bk.ru.

Статья поступила в редакцию 05.12.2023, одобрена после рецензирования 21.04.2024, принята к публикации 23.04.2024.



Анализ работы распределенного реестра данных на примере аэропорта



Игорь РОЗЕНБЕРГ



Яков ДАЛИНГЕР

*Игорь Наумович Розенберг ¹,
Яков Михайлович Далингер ²*

^{1,2} Российский университет транспорта, Москва, Россия.

*¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9589-6783>;
Web of Science Researcher ID: AAD-7632-2019;
Scopus Author ID: 15136568900; РИНЦ SPIN-код:
2958-4186; РИНЦ Author ID: 652172.*

*² ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7744-7156>;
Web of Science Researcher ID: B-6790-2019;
Scopus Author ID: 57195278185; РИНЦ SPIN-код:
8895-3700; РИНЦ Author ID: 704687.*

✉ ² iakovdalinger@gmail.com.

АННОТАЦИЯ

Показаны возможности применения технологии распределенного реестра для хранения данных в информационных системах аэропортов и авиационных систем различного уровня.

Отмечены особенности работы распределенного реестра в информационных системах. Исследованы различные варианты формирования сообщений для хранения в распределенном реестре и параметры потоков сообщений. Выделены особенности применения технологии блокчейн

при создании распределенных реестров в случае необходимости коррекции хранимой информации.

Показаны возможности применения сетевых технологий при формировании распределенных реестров, узлы которых находятся на значительных расстояниях друг от друга (реестры нескольких аэропортов).

Представленные данные могут применяться при создании надежных распределенных хранилищ информации, как в рамках отдельного аэропорта, так и для группы аэропортов.

Ключевые слова: распределенная информационная система, распределенный реестр, блокчейн, информационная безопасность, криптозащита, математические модели, гражданская авиация, аэропорты.

Для цитирования: Розенберг И. Н., Далингер Я. М. Анализ работы распределенного реестра данных на примере аэропорта // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-4>.

**Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Технология распределенных реестров (часто, технология на базе блокчейн) становится все более популярной при создании распределенных информационных систем ввиду таких ее особенностей, как [1–6]:

- распределенное хранение копий, позволяющее осуществлять одновременный доступ к реестру многих пользователей в различных географических точках;
- невозможность внесения несанкционированных изменений в созданные копии;
- высокая функциональная надежность реестра;
- возможность управления доступом к копиям реестра;
- когерентность (полное соответствие) копий реестра;
- возможность неограниченного наращивания содержимого реестра.

Это позволяет применять технологию распределенных реестров для построения специализированных информационных систем предприятий и их объединений на региональном и федеральном уровнях¹.

Процесс создания специализированных информационных систем на базе распределенных реестров и их эксплуатация значительно отличаются от методов создания и эксплуатации систем, связанных с криптовалютой, что необходимо учитывать при проведении разработок.

Основные отличия состоят в следующем:

- Отсутствие майнинга, связанного с необходимостью конкурировать за право занесения данных в реестр и вознаграждение.
- Территориальная локализация копий распределенного реестра (например, в пределах региона, государства и т. д.).
- Соблюдение законодательных, отраслевых и прочих нормативов, регламентирующих обработку и доступ к информации.
- Необходимость обеспечения защиты информации от специфических угроз, связанных с функционированием реестра, свойствами хранимой информации управлением доступом (решение задач кибербезопасности).

¹ Спиркина А. В. Разработка модели применения систем распределенного реестра и оценки их влияния на сетевые характеристики / Дисс... канд. техн. наук. – СПб.: СПбГУТ, 2022. – 186 с.

• Необходимость обеспечения доступа к реестру большого числа пользователей (администраторы, осуществляющие ведение реестра; пользователи, обращающиеся с запросами к реестру).

• Наличие специальных средств проверки (валидации) данных, заносимых в реестр, в зависимости от назначения данных.

• Наличие криптографических средств защиты данных (шифрование, хэширование, аутентификация) [7–11].

Кроме того, копии реестра содержат большое количество различной информации, структурированной в виде блоков, что требует создания средств ее поиска и представления в удобном для пользователей виде (база данных реестра).

Все это обуславливает целесообразность создания методов анализа вариантов распределенного реестра, обусловленных спецификой его практического применения.

Среди задач организации важное место занимают задачи формирования потока блоков данных для записи в реестр.

Целью исследования является анализ возможности применения технологии распределенного реестра при создании распределенных баз данных информационных систем аэропортов и авиапредприятий различного уровня.

В исследовании были использованы методы системного анализа, теории очередей, теории вероятностей, теории компьютерных сетей и информационных систем.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описание реестра

Распределенный реестр целесообразно создавать как развитие интегрированных распределенных баз данных, когда имеется совокупность информационных ресурсов с установленными связями, системой запросов и обновлений [12]. Возможный вариант организации распределенного реестра рассмотрен для случая транспортного предприятия, например аэропорта, со следующими характеристиками:

1. Распределенный реестр создается на базе имеющихся информационных ресурсов и состоит из группы локальных реестров отдельных подразделений аэропортов.

2. Все локальные реестры могут создаваться в виде блокчейнов – специальных



Рис. 1. Обобщенная структура распределенного реестра аэропорта [составлена авторами].

цепочек данных, обладающих свойствами, перечисленными выше [1; 2; 6; 11].

3. Технологию блокчейн целесообразно применять для случаев, когда имеются повышенные требования к безопасности данных, однако при этом возникают значительные сложности с внесением изменений в хранимые данные.

4. Каждый локальный реестр создается для одного или нескольких подразделений аэропорта, информация локальных реестров может пересекаться.

5. Для внесения записей (блоков) в локальные реестры выделяются специальные рабочие места с соответствующим программным обеспечением, позволяющим

проводить валидацию и согласование данных.

6. Копии локальных реестров доступны сотрудникам – администраторам реестров соответствующих подразделений, которые обеспечивают их заполнение и работу с реестрами по запросам сотрудников аэропорта и внешних организаций (пользователей реестра).

7. Распределенный реестр содержит карту локальных реестров (базу данных реестра), где формируются данные для доступа к локальным реестрам по запросам.

Работа с реестром состоит из формирования блоков документов для записи, записи блоков и копий в локальные реестры,



обработки запросов к реестру (поиск требуемой информации, представление найденной информации в требуемой форме). Сформированные для записи блоки проходят проверку (валидацию) на отсутствие копий, правильность записи и после успешной проверки записываются по установленным правилам в локальный реестр (блокчейн) соответствующего подразделения.

Пример варианта обобщенной структуры распределенного реестра аэропорта приведен на рис. 1. В данном случае локальные реестры созданы с применением технологии блокчейн.

Возможно масштабирование структуры для авиатранспортной системы, включающей несколько авиационных и вспомогательных (обслуживающих) предприятий.

Сотрудники – администраторы локальных реестров имеют право формировать блоки документов для записи в свои реестры, обрабатывать запросы к реестрам.

Блоки состоят из конечного числа документов, которые обрабатываются в данном подразделении.

Каждый администратор формирует блоки из заданного множества доступных ему документов так, что блоки разных администраторов не содержат одинаковых документов.

Документы могут образовываться в процессе работы подразделения либо поступать из внешних подразделений или организаций [13].

Перед записью созданного блока в локальный реестр проводится его валидация, которая заключается в проверке корректности документов, проверке отсутствия одинаковых документов в разных блоках, проверке корректности записи данных о владельце (создателе) блока.

Для валидации созданный блок рассылается всем сотрудникам – администраторам локального реестра. Администратор, получивший блок, проводит его проверку и высылает ответ с результатами проверки в адрес администратора, создавшего блок [13].

Если все ответы собраны и все они положительны, администратор, создавший блок, проводит его запись в свою копию локального реестра.

Если несколько администраторов работают с одной копией, то запись происходит

в установленном для них порядке без розыгрыша права записи.

В заданные моменты времени происходит согласование копий локального реестра.

Возможны уточнения работы, связанные со спецификой предприятия, например, применение шифрования документов, распределение ключей для обработки блоков и документов, установление специальных правил ведения и согласования копий локального реестра.

Для обеспечения поиска документов в пределах всего распределенного реестра составляется карта локальных реестров учреждения. Карта представляет специализированную базу данных, где хранится информация о размещении документов, данные о владельцах блоков, данные для формирования запросов к локальным реестрам.

Для создания и обеспечения работы локальных реестров распределенного реестра создаются аппаратно-программные средства – узлы локальных реестров, которые можно рассматривать как рабочие места администраторов локальных реестров [2; 3]. На узлах создаются блоки данных для записи в реестр.

Все узлы работают в составе локальной сети учреждения либо региональной или местной сети.

Сеть должна обеспечивать возможность реализации установленных прав доступа к узлам для сотрудников учреждения, обеспечить защиту от несанкционированного доступа к реестрам, защиту каналов связи, обеспечить локализацию распределенного реестра в пределах учреждения. Существуют разнообразные решения данных задач, подробно исследованные в литературе [8; 14; 15].

Математические модели узлов локальных реестров

Создание распределенного реестра требует решения ряда задач и анализа, позволяющих получать численные значения характеристик работы распределенного реестра в зависимости от параметров (интенсивность потока запросов к реестру, интенсивность потока документов для занесения в реестр, длительность обработки запросов в реестре, структура и состав блоков реестра):

- анализ процессов формирования блоков документов на узлах для записи в локальные реестры;

- анализ процессов записи блоков в блокчейны локальных реестров и создания копий;

- анализ процессов обработки запросов пользователей реестра.

Для проведения анализа разработаны математические модели с поглощением сообщений, представленные в работах [13; 16–18]. Ряд моделей, позволяющих исследовать сетевые структуры, представлен в работе [14].

В данном случае поглощение элементарных сообщений (документов) подразумевает формирование из них блоков для записи в реестр.

В моделях каждый документ соответствует элементарному сообщению, а процесс формирования блока документов соответствует созданию сложного сообщения (блока) в системах с поглощением элементарных сообщений.

Как правило, число документов, поступающих для обработки и хранения конечно, поэтому в качестве модели узла рассматривалась система с фиксированным составом сложного сообщения (блока документов) и с ограниченным числом мест для ожидания в очереди элементарными сообщениями (документами).

При создании моделей считалось, что на узел поступает N потоков документов – элементарных сообщений ($\infty > N \geq 1$), из этих сообщений формируется M блоков (сложных сообщений). Правила формирования блоков на узлах задаются матрицей $M = \|m_{ij}\|$, где $m_{ij} \geq 0$ – число документов потока номер j , которые входят в состав блока типа i ($i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$) [19].

При формировании элементов матрицы M предполагалось соблюдение условий:

а) документы каждого потока могут участвовать при создании блоков только одного типа (для каждого сотрудника установлены наборы доступных документов и каждое подразделение создает свои блоки и документы);

б) в каждый блок входит хотя бы один документ.

Возможны варианты, учитываемые в математических моделях:

- длительность формирования блока не ограничена, и формирование заканчивается при поступлении необходимого количества документов;

- длительность формирования блока ограничена;

- число документов в блоке случайная величина.

Потеря документов в реестре исключается за счет задания на узлах достаточно большого количества мест для ожидания документами формирования блоков, в состав которых они войдут.

Модели для анализа вариантов представлены в работах [13; 16–18; 20]. Модели дают возможность дополнительно исследовать следующие варианты состава формируемых блоков документов: блок формируется из документов только одного типа (потока), количество которых задано; блок формируется из документов различных потоков, количество документов каждого потока задано.

Применение математических моделей позволяет вычислять значения характеристик реестра, в числе которых:

- средняя длительность формирования блока документов для записи в реестр;

- среднее время ожидания документом записи в реестр;

- средняя длина очереди документов;

- среднее время записи блока в реестр (при вычислении этой характеристики учитывается отсутствие состязаний при записи в реестр (блокчейн), и запись происходит в установленном для узлов администраторов порядке).

Модели позволяют варьировать параметры реестра (моделей, соответственно) для поиска оптимальных или приемлемых по значениям характеристик решений. Среди этих параметров:

- состав блока;

- средняя длительность формирования блока;

- допустимая длина очереди документов;

- количество узлов администрирования для локального реестра.

Математические модели анализа систем возможно применять для анализа процессов создания и эксплуатации распределенного реестра, работающего без определения очередности права записи формируемых блоков (сложных сообщений).



ВЫВОДЫ

Технология распределенных реестров и технология блокчейн сегодня занимают важное место в решении задач защиты информации: обеспечение целостности, защита от изменений данных, управление доступом, согласование данных.

Большое разнообразие практических приложений, где используются данные, требует разработки и предварительного анализа методов создания блоков данных для хранения в реестре, структуры и алгоритмов работы узлов распределенного реестра. Для решения этих задач целесообразно использовать математическое моделирование.

Данные о возможном создании и исследовании распределенного реестра на базе блокчейн для аэропорта можно масштабировать для случая авиатранспортной системы, для региональных систем управления авиаперевозками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Башир И. Блокчейн: архитектура, криптовалюта, инструменты разработки, смарт-контракты / Пер. с англ. М. А. Райтмана. – М.: ДМК Пресс, 2019. – 538 с. ISBN 978-5-97060-624-7.
2. Горбунова М. В. Омётов А. Я., Комаров М. М., Беззатеев С. В. Обзор проблем внедрения технологии распределенного реестра // Информационно-управляющие системы. – 2020. – № 2 (105). – С. 10–19. DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-10-19.
3. Носиров З. А., Фомичев В. М. Анализ блокчейн-технологии: основы архитектуры, примеры использования, перспективы развития, проблемы и недостатки // Системы управления, связи и безопасности. – 2021. – № 2. – С. 37–75. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-37-75.
4. Khan, N. FAST: A MapReduce Consensus for High Performance Blockchains. In: Proceedings of the 1st Workshop on Blockchain-enabled Networked Sensor Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1145/3282278.3282279.
5. Sadeghi, M., Mahmoudi, A., Deng, X. Adopting distributed ledger technology for the sustainable construction industry: evaluating the barriers using Ordinal Priority Approach. Environmental Science and Pollution Research, 2022, Vol. 29 (7), pp. 10495–10520. DOI: 10.1007/s11356-021-16376-y.
6. Sherman, A. T., Javani, F., Zhang, H., Golaszewski, E. On the Origins and Variations of Blockchain Technologies.

IEEE Security Privacy, 2019, 17 (1), pp. 72–77. DOI: 10.1109/MSEC.2019.2893730.

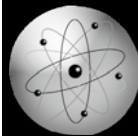
7. Рябко Б. Я., Фионов А. Н. Криптография в информационном мире. – М.: Горячая линия – Телеком, 2018. – 300 с. ISBN: 978–5–9912–0729–4.
8. Столлингс В. Криптография и защита сетей: принципы и практика / Пер. с англ. 2-е изд. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 672 с. ISBN: 5–8459–0185–5.
9. Чмора А. Современная прикладная криптография. – М.: Гелиос АРБ, 2001. – 256 с. ISBN: 5–85438–037–4.
10. Haber, S., Stornetta, W. S. How To Time-Stamp a Digital Document. Journal of Cryptology, 1991, Vol. 3, Iss. 2, pp. 99–111. DOI: 10.1007/bf00196791.
11. Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., Goldfeder, S. Bitcoin and Cryptocurrency Technologies: A Comprehensive Introduction. Princeton University Press, 2016, 336 p. ISBN: 978-0-691-17169-2.
12. Арсеньев Б. П., Яковлев С. А. Интеграция распределенных баз данных. – СПб.: Изд-во «Лань», 2001. – 464 с. ISBN: 5–8114–0300–3.
13. Pankov, K. N., Saksonov, E. A. Using Probabilistic Methods in the Analysis of Information Security of Distributed Ledger Systems. In: 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416006.
14. Вишневский В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с. ISBN: 5–94836–011–3.
15. Таненбаум Э., М. ван-Стеен. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. – СПб.: Питер, 2003. – 877 с. ISBN: 5–272–00053–6.
16. Далингер Я. М. Анализ потоков сложных сообщений в системах обработки информации // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2015. – № 1 (36). – С. 59–64. EDN: TPTDKD.
17. Daling, Ya. M., Leokhin, Yu. L., Saksonov E. A. The Model of the Processing Node with the Data Absorption. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, Belarus, 2018, pp. 193–197. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457008.
18. Saksonov, E. A., Leokhin, Yu. L., Daling, Ya. M. The Model of the Processing Node with the Data Replication. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, Belarus, 2018, pp. 564–568. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457025.
19. Далингер Я. М. Анализ потоков данных в системах с поглощением сообщений // Информатика и системы управления. – 2012. – № 3. – С. 26–34. [Электронная версия журнала]: https://ics.togudv.ru/media/2012/N33_03_1.pdf. Доступ 23.08.2024.
20. Maull, R., Godsiff, Ph., Mulligan, C., Brown, A., Kewell, B. Distributed ledger technology: Applications and implications. FINRA, 2017, Vol. 26, Iss. 5, pp. 481–489. DOI: 10.1002/jsc.2148 [доступ для подписчиков].

Информация об авторах:

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, научный руководитель Российского университета транспорта, Москва, Россия, info@science-rut.ru.

Далингер Яков Михайлович – кандидат технических наук, проректор Российского университета транспорта, Москва, Россия, iakovdaling@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 16.08.2024, одобрена после рецензирования 16.09.2024, принята к публикации 25.09.2024.



Метод определения долговечности пролётного строения моста



Глеб ОГУРЦОВ



Николай ЕРМОШИН

**Глеб Леонидович Огурцов¹,
Николай Алексеевич Ермошин²**

^{1, 2} Высшая школа промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

¹ORCID: 0000-0002-5183-7420; Web of Science Researcher ID: AFI-6310-2022; Scopus Author ID: 57939891300; ПИНЦ SPIN-код: 1150-8781; РИНЦ Author ID: 957338.

²ORCID: 0000-0002-0367-5375; Web of Science Researcher ID: ABA-1133-2020; Scopus Author ID: 57215847497; ПИНЦ SPIN-код: 6694-8297; РИНЦ Author ID: 735873.

✉ ¹ogurtsov_gl@spbstu.ru.

АННОТАЦИЯ

Целью исследования является разработка метода определения долговечности железобетонной балки пролётного строения при воздействии агрессивных сред.

Научное обоснование метода выполнено на основе законов установления среды однородных частей железобетона равномерного распределения концентраций атмосферных газов и определения глубины их диффузии. Для описания скорости проникновения применены аналитические уравнения определения глубины диффузии атмосферных газов в бетон. При достижении продуктами диффузии рабочей арматуры начинаются процессы коррозии, что вызывает снижение эффективной площади, и, как следствие, потерю несущей способности балки пролётного строения во время эксплуатации мостового сооружения.

На основании предложенного метода расчёта сформирована регрессионная модель оценки долговечности железобетонных конструкций в зависимости от диффузии агрессивных сред и разного количества дней в году с осадками. Анализ полученных результатов показал, что при достижении продуктов диффузии атмосферных газов рабочей арматуры начинаются процессы необратимых изменений (необратимого снижения) несущей способности пролётного строения. Установлено, что срок службы до отказа при воздействии галогенов и галогеноводородных кислот может составить не более 30 лет. Применение метода позволяет определять остаточный срок службы пролётного строения на основании оценки ресурса несущей способности и разрабатывать нормативные документы по срокам выполнения ремонтных работ.

Ключевые слова: транспортное строительство, долговечность, срок службы, несущая способность, пролётное строение, мостовое сооружение, коррозия арматуры, агрессивные среды.

Для цитирования: Огурцов Г. Л., Ермошин Н. А. Метод определения долговечности пролётного строения моста // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 33–42. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-5>.

**Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Мостовые сооружения являются неотъемлемой частью автомобильных дорог, от их состояния зависит безопасность дорожного движения. В целях предупреждения аварийного состояния автодорожных мостов требуется определять несущую способность их конструктивных элементов с учётом дефектов, вызванных воздействием транспорта и агрессивными средами.

Надёжность железобетонных пролётных строений во многих случаях определяется их долговечностью и безотказностью. Снижение несущей способности пролётного строения в результате дефектов, вызванных воздействием агрессивных сред, снижает срок службы и является одной из основных причин преждевременного разрушения мостовых конструкций с нанесением вреда жизни и здоровью людей, имуществу и окружающей среде. Для обеспечения работоспособного состояния мостовых сооружений необходимо производить преждевременные ремонты, восстановление или замену вышедших из строя конструктивных элементов [1].

На возникновение дефектов пролётного строения, снижающих несущую способность, влияют природно-климатические условия и техногенные факторы [2]. Природно-климатические условия вызывают постепенное старение материалов, снижение модуля упругости и прочности на растяжение и сжатие бетона, уменьшение полезной площади армирования и, как следствие, потерю несущей способности и отказ мостового сооружения. К техногенным факторам, прежде всего, следует отнести изменение интенсивности и состава движения транспортных средств. Их воздействие вызывает накопление и развитие усталостных деформаций и повреждений, а также износ материалов конструктивных элементов. В настоящее время нормативной документацией¹ предусматривается, что параметры железобетонного элемента (размеры поперечного

сечения, диаметр арматуры, прочность на сжатие и т. д.) остаются неизменными на всем сроке службы. Однако в связи с тем, что бетон имеет капиллярно-пористую структуру, при эксплуатации мостового сооружения возникают следующие дефекты пролётного строения: коррозия арматуры, изменение прочности бетона на растяжение и сжатие, а также уменьшение площади рабочей арматуры при циклическом нагружении, что приводит к снижению несущей способности балок пролётного строения.

Таким образом, целью исследования является разработка и обоснование метода определения долговечности железобетонной балки пролётного строения моста в условиях воздействия агрессивных сред, влияние которых приводит к деградации свойств материалов и снижению несущей способности.

МЕТОДОЛОГИЯ

Начало коррозии арматуры пролётного строения обусловлено процессом диффузии газа, содержащегося в атмосфере, в бетон и последующей депассивации арматурных стержней. Процесс депассивации заключается в образовании и распространении транскристаллитных трещин вглубь металла с уменьшением полезной площади его поперечного сечения в результате одновременного воздействия циклических растягивающих нагрузок и анодного растворения металла. Диффузия описывается аналитическими уравнениями первого и второго законов Фика [3]. Воздействие агрессивных сред зависит от условий эксплуатации мостового сооружения и мероприятий по его содержанию [4; 5]. Степень влияния процесса диффузии определяется различным составом и концентрацией атмосферных газов. В рамках исследований [6–8] рассмотрены основные атмосферные газы, взаимодействующие с бетоном и арматурой. Особое внимание заслуживают углекислый газ (CO_2), галогены (Cl_2) и галогенводородные кислоты (HCl), так как при достижении фронтом диффузии арматурных стержней начинается процесс коррозии [9], что приводит к изменению несущей способности пролётного строения.

В статьях [3; 10; 11] приведены результаты исследований, в ходе которых определена скорость диффузии углекислого газа в бетонные образцы. Скорость диффузии зависит от концентрации углекислого газа на поверх-

¹ СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. [Электронный ресурс]: https://ano-alpha.ru/upload/iblock/58c/mjvjzkyrjsdmzq31jd53bipez0mxsqd5/SP_63.13330.2018_-2.pdf. Доступ 01.08.2024.

² СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. [Электронный ресурс]: [https://www.mos.ru/upload/documents/files/4784/SP35133302011MostiitrybiAktualizirovannayaredakciyaSNiP20503-84\(sIzmeneniemN1\).Tekst.pdf?ysclid=m8sod9x4tj580224091](https://www.mos.ru/upload/documents/files/4784/SP35133302011MostiitrybiAktualizirovannayaredakciyaSNiP20503-84(sIzmeneniemN1).Tekst.pdf?ysclid=m8sod9x4tj580224091). Доступ 01.08.2024.

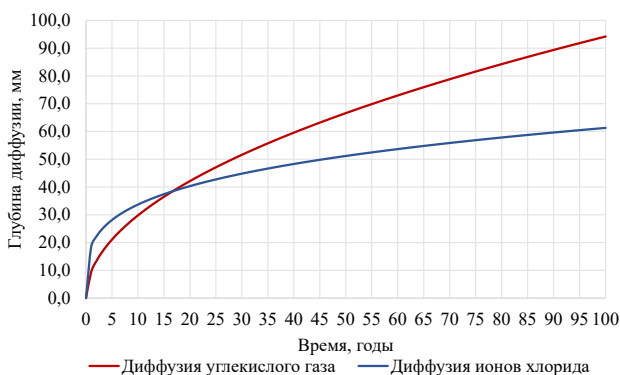


Рис. 1. Глубина диффузии углекислого газа и ионов хлорида [разработано авторами].

ности образцов, водоцементного отношения и применяемого заполнителя бетона. Глубина диффузии углекислого газа [3] определяется по формуле (1):

$$X_c = \sqrt{2 \cdot D_{CO_2} \cdot a^{-1} \cdot (c_1 - c_2) \cdot \tau_{carb}}, \quad (1)$$

где τ_{carb} – время воздействия углекислого газа, с;

D_{CO_2} – коэффициент диффузии CO_2 вглубь бетона, m^2/s , который зависит от состава бетона, степени гидратации и содержания влаги;

c_1 и c_2 – соответственно, содержание диоксида углерода на внешней поверхности бетона и на границе карбонизации (бесконечно малая величина), частей на миллион (ppm);

a – количество CO_2 , необходимое для превращения всех способных карбонизироваться продуктов гидратации цемента [12], kg/m^3 , определяемое по формуле (2):

$$a = 0,4 \cdot f \cdot p \cdot Ц, \quad (2)$$

где f – степень нейтрализации бетона, равная отношению количества основных окислов, прореагировавших с углекислым газом, к общему их количеству в цементе, принимаемая равной 0,6;

p – количество основных окислов в цементе в пересчете на CaO в относительных величинах по массе по данным химического анализа, принимаемая равной 0,6;

$Ц$ – численное равное содержание цемента в бетоне, kg/m^3 .

Глубина диффузии ионов хлорида [3] определяется по формуле (3):

$$X_{cl} = \sqrt{4 \cdot D_{cl0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\left(\frac{3 \cdot B}{11} - 0,6 \right)} \cdot \left(erf^{-1} \left(\frac{C_s - C_{crit}}{C_s} \right) \right)^2 \cdot \tau_{cl}}, \quad (3)$$

где τ_{cl} – время воздействия ионов хлорида, с;

C_s и C_{crit} – соответственно концентрация хлоридов на поверхности бетона защитного

слоя и критическая концентрация хлоридов на поверхности арматуры, % по массе цемента;

t_0 и t – соответственно, возраст бетона $t_0 = 28$ суток и фактический возраст t , сутки;

erf^{-1} – функция ошибок Гаусса;

D_{cl0} – коэффициент диффузии хлоридов в бетоне [3], m^2/s , определяемый по формуле (4):

$$D_{cl0} = 10^{(-12,06 + 2,4 \cdot B / 11)}. \quad (4)$$

С использованием выражений (1) и (3) построены графики глубины диффузии углекислого газа и ионов хлорида [14] по годам (рис. 1) для постоянных значений формул (1) и (3). Процессы проникновения углекислого газа и ионов хлорида происходят от поверхности непораженного бетона внутрь элемента.

В статьях [8; 10; 11; 14] приведены результаты экспериментальных исследований воздействий продуктов карбонизации на прочность бетона при различных концентрациях углекислого газа. Установлены зависимости, свидетельствующие о том, что при увеличении времени ускоренной карбонизации и концентрации углекислого газа происходит рост предельной прочности бетона на сжатие, при этом отсутствуют сведения об изменении предельной прочности на растяжение. В процессе карбонизации [14–17] бетона образуются сложные полимерные сростки и наблюдается отсутствие видимых игольчатых кристаллов гидросиликата кальция, цементирующих структуру бетона, что приводит к снижению когезии и прочности бетона на растяжение, но увеличивает прочность бетона на сжатие. Как показали исследования [18], диффузия ионов хлоридов приводит к снижению прочности бетона на сжатие и растяжение.



При достижении продуктами диффузии углекислого газа и ионов хлорида арматурных стержней, а также при снижении кислотно-щелочного баланса бетона начинается процесс коррозии, в ходе которого происходит уменьшение эффективной площади арматурного стержня. Коррозия арматуры является электрохимическим процессом, которая возникает при уменьшении щёлочности окружающей среды до значений pH, равной 11, а также при действии ионов хлорида [19, 20]. Для описания данного процесса [3] используется формула (5):

$$A_{cor} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2} - 0,01 \cdot \frac{N_w}{365} \cdot t_{cor} \right)^2, \quad (5)$$

где N_w – количество дней в году с осадками более 2,5 мм;

t_{cor} – время коррозии, годы.

При наличии трещины, шириной 0,3 мм и более [17], или локального повреждения происходит ускорение процесса коррозии арматуры. Данный процесс [3] описывается формулой (6):

$$A_{cor} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2} - 0,06 \cdot \frac{N_w}{365} \cdot t_{cor} \right)^2. \quad (6)$$

При воздействии ионов хлорида на арматуру скорость коррозии повышается. Эффективная площадь в данном случае [3] определяется по формуле (7):

$$A_{cor} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2} - 0,28 \cdot \frac{N_w}{365} \cdot t_{cor} \right)^2. \quad (7)$$

В рамках данного исследования рассмотрено поперечное сечение балки Б 3300.б.153-ТВ пролётного строения, соответствующего рабочим чертежам «Союздорпроект». В соответствии с зависимостью (1) определено, что при воздействии углекислого газа фронт диффузии достигает верхней ненапрягаемой рабочей арматуры (АIII Ø12) пролётного строения в течение пяти лет (рис. 2) и нижней ненапрягаемой арматуры (AI Ø8) за девять лет (рис. 3). Коррозия напрягаемой арматуры (К7 24Ø5В) начинается на 44-й год после ввода в эксплуатацию сооружения (рис. 4). Изменение эффективной площади при коррозии описывается квадратичной зависимостью, но в силу малого изменения диаметра арматуры, протекает медленно, приближаясь к линейной зависимости (см. рис. 2–4).

В течение срока службы пролётного строения в результате диффузии ионов хлорида начинается коррозия верхнего и нижнего ненапрягаемого армирования в возрасте трёх

и пяти лет соответственно (рис. 5 и 6), а напрягаемой арматуры – в возрасте 24 лет (рис. 7) в результате раскрытия трещин [3].

Обоснование закономерностей изменения площади арматурных стержней в результате процесса карбонизации позволяет перейти к определению несущей способности железобетонных конструкций.

Расчёт предельного изгибающего момента производится по прочности нормального сечения железобетонного пролётного строения. В данной модели принимаются предельные усилия для сжатого бетона, равные сопротивлению сжатию R_b ; для растянутого бетона, равные сопротивлению растяжению R_{bt} ; для растянутой продольной ненапрягаемой арматуры, равные сопротивлению растяжению R_s ; для сжатой – R_{sc} ; для напрягаемой продольной арматуры, равные сопротивлению растяжению R_p . Сопротивления бетона сжатию и растяжению принимаются равномерно распределёнными по сжатой и растянутой зонам.

Нормальное сечение (рис. 8) разбивается на множество элементарных площадок с шагом S.

Предельные усилия, создаваемые на элементарных площадках, приложены к центру. Решение задачи сводится к поиску положения точки «О», которая находится на границе сжатой и растянутой зон. Поскольку задача осесимметричная, точка «О» располагается на вертикальной оси нормального сечения.

Предельный изгибающий момент нормального сечения определяется по формуле (8), которая получена при решении уравнения равновесия моментов относительно точки «О»:

$$\sum_{i=1}^n R_b \cdot A_{bi} + \sum_{u=1}^p R_{sc} \cdot A_{scu} - \sum_{j=1}^m R_{bt} \cdot A_{bj} - \sum_{y=1}^k R_s \cdot A_{sy} - \sum_{e=1}^l R_p \cdot A_{pe} = 0, \quad (8)$$

где Z_{bi} – плечо действия усилия для i -ой элементарной площадки сжатого бетона, мм;

Z_{scu} – плечо действия усилия для u -ой сжатой арматуры, мм;

Z_{bj} – плечо действия усилия для j -ой элементарной площадки растянутого бетона, мм;

Z_{sy} – плечо действия усилия для y -ой растянутой арматуры, мм;

Z_{pe} – плечо действия усилия для p -ой предварительно напряжённой арматуры, мм;

A_{bi} , A_{scu} , A_{bj} , A_{sy} , A_{pe} – площади элементарных площадок сжатого бетона, сжатой арматуры, растянутого бетона, растянутой арматуры,

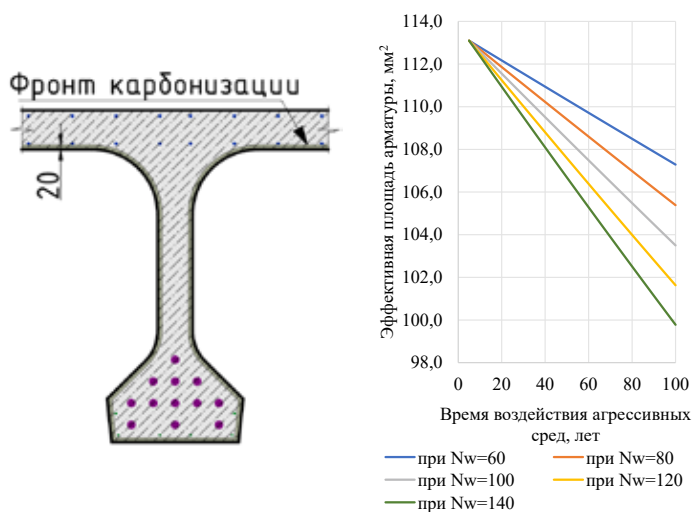


Рис. 2. Распределение фронта карбонизации поперечного сечения через пять лет [разработано авторами].

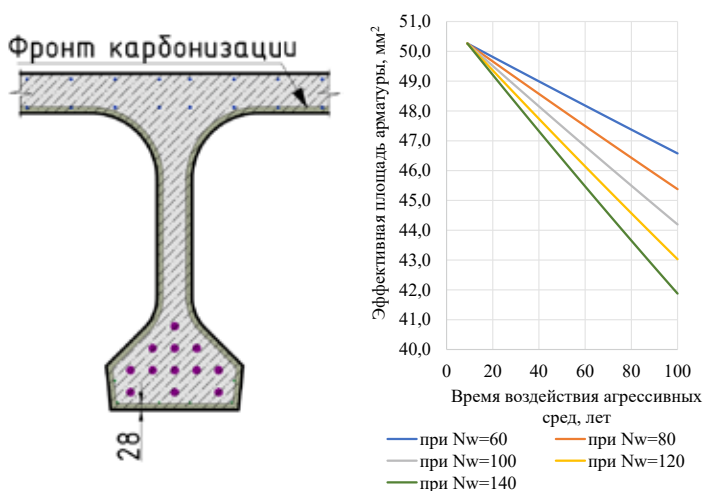


Рис. 3. Распределение фронта карбонизации поперечного сечения через девять лет [разработано авторами].

[разработано авторами].

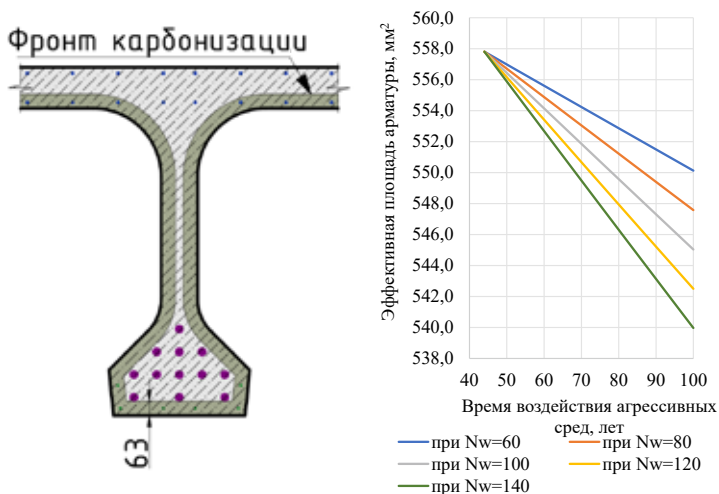


Рис. 4. Распределение фронта карбонизации поперечного сечения через 44 года [разработано авторами].



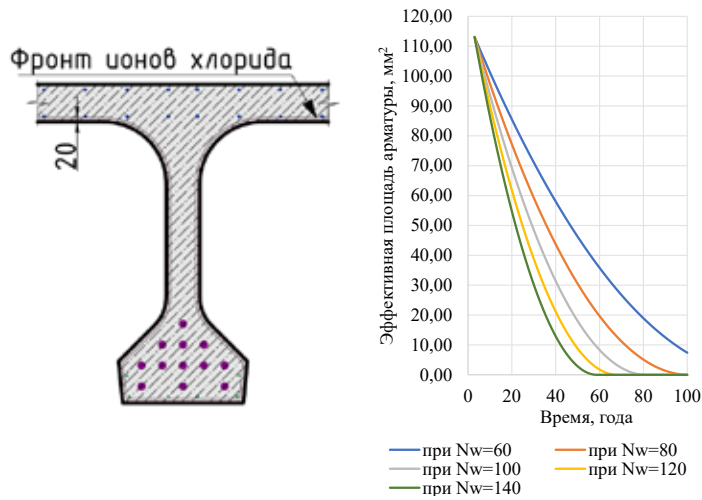


Рис. 5. Распределение ионов хлорида в поперечном сечении через три года [разработано авторами].

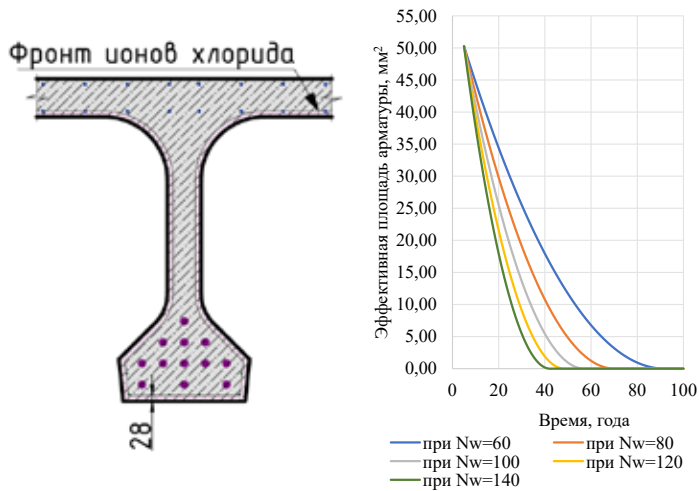


Рис. 6. Распределение ионов хлорида в поперечном сечении через пять лет [разработано авторами].

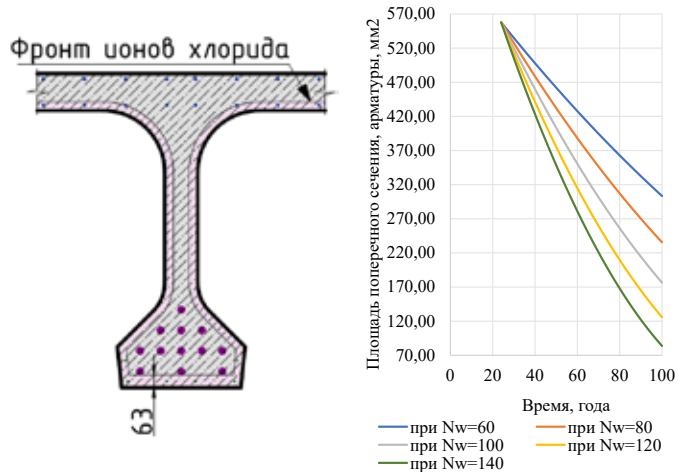


Рис. 7. Распределение ионов хлорида в поперечном сечении через 24 года [разработано авторами].

туры и напрягаемой арматуры соответственно, мм².

Плечи действия усилий являются детерминированными величинами, которые определяются по формулам (9–13):

$$Z_{bi} = x - 10 \cdot a_i, \quad (9)$$

$$Z_{btj} = 1530 - x - 10 \cdot b_j, \quad (10)$$

$$Z_{scu} = x - Z_u, \quad (11)$$

$$Z_{sy} = 1530 - x - Z_y, \quad (12)$$

$$Z_{pe} = 1530 - x - Z_e, \quad (13)$$

где x – фактическая высота сжатой зоны, мм;
 a_i, b_j – порядковый номер горизонтального ряда сжатых и растянутых элементарных площадок соответственно;

Z_u, Z_y, Z_e – расстояния от центра сжатой, растянутой и напрягаемой арматуры до ближайшего края элемента, мм.

Площади элементарных площадок нормального сечения являются постоянными величинами для определённого момента времени.

При определении предельного изгибающего момента должно выполняться условие (14), которое получено при решении уравнения равновесия сил применительно к продольной оси (ортогональной плоскости нормального сечения) элемента:

$$\sum_{i=1}^n R_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_{u=1}^p R_{sc} \cdot A_{scu} - \sum_{j=1}^m R_{btj} \cdot A_{btj} - \sum_{y=1}^k R_{sy} \cdot A_{sy} - \sum_{e=1}^l R_p \cdot A_{pe} = 0. \quad (14)$$

Расчёт нормального сечения во времени производится в соответствии с формулами (8) и (14). Значения эффективной площади рабочей арматуры определяется в соответствии с рис. 2–7 для конкретного момента времени. Результаты произведённых расчётов представлены на рис. 9 для различного количества осадков в течение года при воздействии углекислого газа, а на рис. 10 – при воздействии ионов хлорида.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения возникающих усилий произведено моделирование разрезного пролётного строения, выполненного с применением балок 3300.б.153-ТВ. При расположении подвижной нагрузки над балкой в центре пролёта создается изгибающий момент $M_y = 8787,90$ кН·м (рис. 11).

Анализ полученных результатов (см. рис. 9, 10) показал, что при достижении рабочей арматуры начинаются процессы необратимых изменений (необратимого снижения)

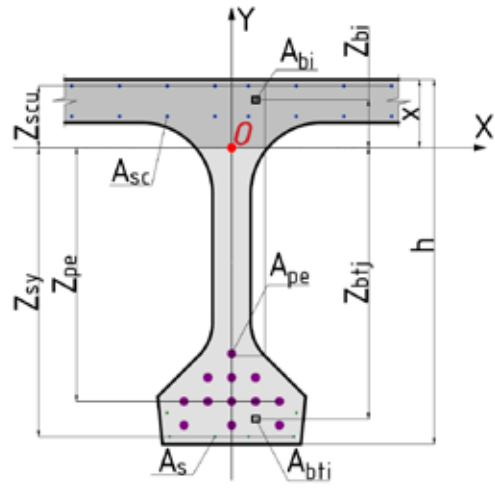


Рис. 8. Расчётная схема нормального сечения [разработано авторами].

несущей способности пролётного строения. В процессе диффузии углекислого газа происходит коррозия арматурных стержней, что приводит к снижению несущей способности балок пролётного строения. До начала коррозии напрягаемой арматуры (45 лет) наблюдается потеря 0,03 % от первоначальной несущей способности балки пролётного строения, после 45 лет потеря составляет 0,52 %.

Обоснование формулы прогнозирования текущего предельного изгибающего момента выполнено на основании графиков, представленных на рис. 12, 13.

Значение предельного изгибающего момента для балки, подвергнутой воздействию углекислого газа в течение времени t , и для количества дней в году с осадками более 2,5 мм N_w определяется по формуле (15):

$$M_t = M_{y,0} \cdot (1 - 0,13 \cdot N_w \cdot t^2 \cdot 10^{-7} + 0,04 \cdot N_w \cdot t \cdot 10^{-5}), \quad (15)$$

где t – фактическое время воздействия углекислого газа на пролётное строение, лет;

N_w – количество дней в году с осадками более 2,5 мм;

$M_{y,0}$ – начальное значение предельного изгибающего момента, кНм.

Снижение несущей способности свидетельствует о негативном воздействии диффузии углекислого газа. Во время эксплуатации следует принимать меры к предотвращению диффузии атмосферных газов: окрашивание поверхности бетона и применение уплотняющих структуру добавок. Также необходимо контролировать и производить замену поражённого бетона до достижения фронтом на-



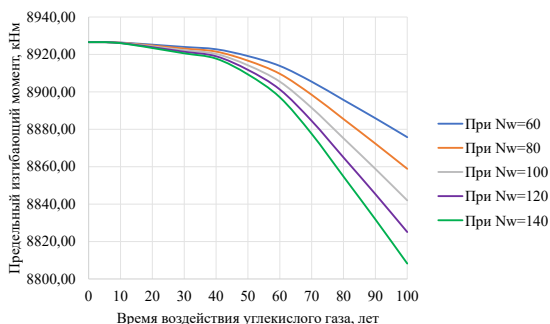


Рис. 9. Изменение предельного изгибающего момента при воздействии углекислого газа и разном количестве дней с осадками в год [разработано авторами].

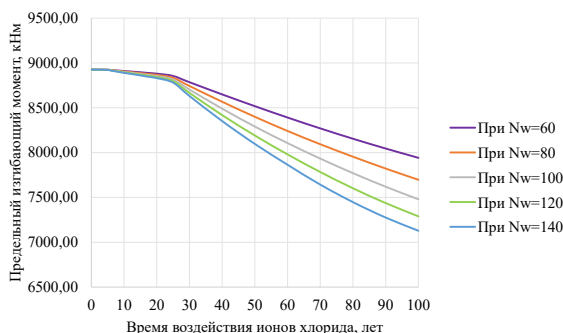


Рис. 10. Изменение предельного изгибающего момента при воздействии ионов хлорида и разном количестве дней с осадками в год [разработано авторами].

прягаемой арматуры. После начала коррозии напрягаемой арматуры происходит необратимый процесс снижения эксплуатационных свойств, при этом изгибающий момент от действия подвижной нагрузки не превышает предельного значения в течение срока эксплуатации. Отказы балок пролётного строения наступают в возрасте 105; 117; 126; 139 и 158 лет.

В процессе эксплуатации пролётного строения ионы хлорида достигают напрягаемую арматуру в результате раскрытия трещин, образовавшихся при коррозии ненапрягаемого нижнего армирования и снижения прочности бетона. Коррозия верхнего и нижнего ненапрягаемого армирования начинается в возрасте трёх и пяти лет соответственно, напрягаемой арматуры – в 24 года. Скорость процесса коррозии при воздействии ионов хлоридов в 28 раз выше, чем при воздействии углекислого газа, но проникающая способность ниже. До начала коррозии напрягаемой арматуры (24 года) наблюдается потеря 0,72 % от первоначальной несущей способности балки пролётного строения, после 24 лет потеря составляет 9,84 %.

Значение предельного изгибающего момента для балки, подвергнутой воздействию ионов хлорида в течение времени t и количества дней в году с осадками более 2,5 мм N_w , определяется по формуле (16):

$$M_t = M_{y,0} \cdot (1 - 0,82 \cdot N_w \cdot t^2 \cdot 10^{-7} - 0,12 \cdot N_w \cdot t \cdot 10^{-4}), \quad (16)$$

где t – фактическое время воздействия углекислого газа на пролётное строение, лет;

N_w – количество дней в году с осадками более 2,5 мм;

$M_{y,0}$ – начальное значение предельного изгибающего момента, кНм.

Во время эксплуатации мостового сооружения с преобладающим воздействием ионов хлорида следует не допускать возникновения трещин, в результате которых возникнет коррозия напрягаемой арматуры. Отказы балок пролётного строения происходят в возрасте 25; 26; 27; 28 и 30 лет.

ВЫВОДЫ

В данном исследовании предложен метод определения долговечности железобетонной балки пролётного строения моста при воздействии агрессивных сред. Предложенный метод состоит из шести этапов:

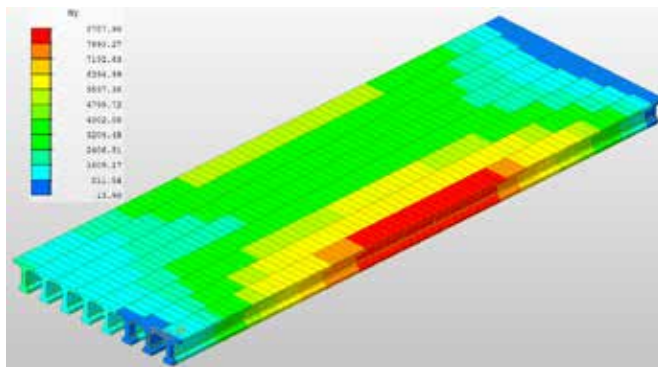


Рис. 11. Эпюра изгибающих моментов M_y , кН·м [разработано авторами].

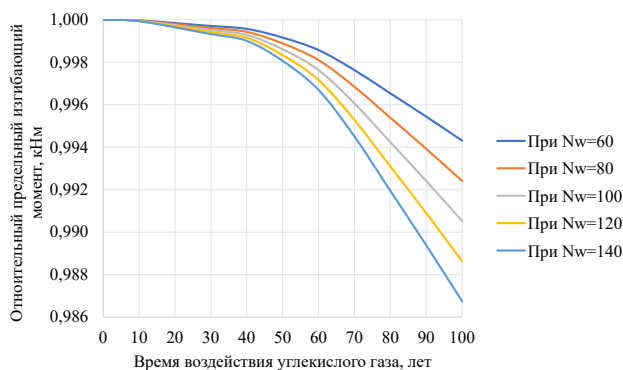


Рис. 12. Изменение относительного предельного изгибающего момента при воздействии углекислого газа и разном количестве дней с осадками в год [разработано авторами].

1. Определение превалирующего воздействия агрессивной среды.
2. Определение скорости диффузии атмосферных газов.
3. Определение изменения эффективной площади поперечного сечения арматуры.
4. Оценка несущей способности балки пролетного строения в начале эксплуатации.
5. Расчёт текущего предельного изгибающего момента балки.
6. Определение остаточного срока службы.

Получены зависимости предельных изгибающих моментов балки пролетного строения для различных условий эксплуатации, определённых на основании аналитических зависимостей диффузии атмосферных газов (углекислый газ (CO_2), галогены (Cl_2) и галогенводородные кислоты). В качестве основного воздействующего условия выбрано количество дней с осадками в течение года.

Предложенный метод использован при расчёте несущей способности железобетонной балки пролетного строения Б 3300.б.153-ТВ. Установлено, что срок её службы до отказа при воздействии углекислого газа составляет

158 лет, при воздействии галогенов и галогенводородных кислот – 27 лет.

Таким образом, применение данного метода позволяет определять оставшийся срок службы пролётного строения, а также ресурс по несущей способности и прогнозировать требуемые ремонтно-восстановительные работы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гулицкая Л. В., Шиманская О. С. Анализ технико-эксплуатационного состояния железобетонных плитных пролетных строений автодорожных мостовых сооружений // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2017. – № 1. – С. 35–45. DOI: 10.15593/24111678/2017.0.1.03.
2. Карапетов Э. С., Белый А. А. Методы оценки технико-эксплуатационных показателей железобетонных мостовых сооружений Санкт-Петербурга // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2009. – № 2 (19). – С. 177–187. EDN: KVKFKX.
3. Бородай Д. И. Прогноз долговечности типовых железобетонных плитных пролетных строений автодорожных мостов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2011. – № 1 (87). – С. 169–176. EDN: FCCMZB.
4. Талипова Л. В., Шонина Е. В. Определение углеродного следа в строительстве // Инженерные задачи: проблемы и пути решения: Материалы II Всероссийской (национальной) научно-практ. конференции. – Архан-



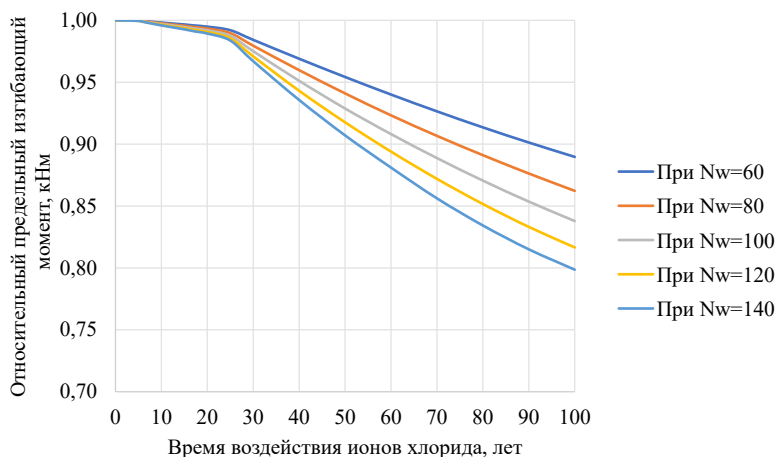


Рис. 13. Изменение относительного предельного изгибающего момента при воздействии ионов хлорида и разном количестве дней с осадками в год [разработано авторами].

гельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, 2021. – С. 99–102. EDN: BSQSGN.

5. Овчинникова Т. С., Маринин А. Н., Овчинников И. Г. Коррозия и антикоррозионная защита железобетонных мостовых конструкций // Интернет-журнал «Науковедение». – 2014. – № 5 (24). – С. 11. EDN: TKELFZ.

6. Никоноров А. Н., Зайцев А. А. Защита мостовых конструкций от атмосферной коррозии // Проблемы науки. – 2020. – № 1 (49). – С. 12–15. EDN: XKAREB.

7. Козлова В. К., Калько И. К., Завадская Л. В., Маноха А. М., Вольф А. В., Хомутов Э. С. Определение степени коррозионного разрушения мостовых железобетонных конструкций // Ползуновский альманах. – 2023. – № 1. – С. 63–66. EDN: MUGTWX.

8. Молодин В. В., Ануфриева А. Е., Леонович С. Н. Влияние карбонизации бетонных поверхностей на их сцепление со свежееуложенным бетоном // Наука и техника. – 2021. – Т. 20. – № 4. – С. 320–328. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328.

9. Moraru, C., Apostu, A., Georgescu, D. Carbonation Resistance Classes of Concretes. Romanian journal of transport infrastructure, 2021, Vol. 10, Iss. 1, pp. 50–65. DOI: <https://doi.org/10.2478/rjti-2021-0004>.

10. Al Fuhaid, A. Effects of fine Aggregates, Cicopowder-WP, and Styrene-Butadiene rubber on carbonation resistance in concrete. Materials Today: Proceedings, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.781>. [Article in press].

11. Chen Ying, Liu Peng, Yu Zhiwu, Li Siyang, Hu Cheng, Lu Dapeng. Research on the performance evolution of concrete under the coupling effects of sulfate attack and carbonation. Journal of materials research and technology, 2023, Vol. 26, pp. 4670–4695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.206>.

12. Троян В. В. Моделирование долговечности железобетонных конструкций // Технологии бетонов. – 2011. – № 5–6 (58–59). – С. 39–41. EDN: TKANWZ.

13. Yin Shen, Yi Wang, Xiaqing Xu, Feipeng Ruan. Study on carbonation of construction joints through field tests on a 30-year-old bridge and accelerated carbonation tests.

Case Studies in Construction Materials, 2023, Vol. 19, e02231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02231>.

14. Maohua Zhang, Lin Du, Zhiyi Li, Ronghua Xu. Durability of Marine Concrete Doped with Nanoparticles under Joint Action of Cl- Erosion and Carbonation. Case Studies in Construction Materials, 2023, Vol. 18, e01982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01982>.

15. Xupeng Ta, Zhijun Wan, Yuan Zhang, Shubing Qin, Jiale Zhou. Effect of carbonation and foam content on CO2 foamed concrete behavior. Journal of materials research and technology, 2023, Vol. 23, pp. 6014–6022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.178>.

16. Bastidas-Arteaga, E., Rianna, G., Gervasio, H., Nogal M. Multi-region lifetime assessment of reinforced concrete structures subjected to carbonation and climate change. Structures, 2022, Vol. 45, pp. 886–899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.061>.

17. Konečný, P., Lehner, P. Durability assessment of concrete bridge deck considering waterproof membrane and epoxy-coated reinforcement. Perspectives in Science, 2016, Vol. 7, pp. 222–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2015.11.036>.

18. Song Gao, Jia Guo, Yaoyao Gong, Shunli Ban, Ang Liu. Study on the penetration and diffusion of chloride ions in interface transition zone of recycled concrete prepared by modified recycled coarse aggregates. Case Studies in Construction Materials, 2022, Vol. 16, e01034. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01034> [полный текст выпуска].

19. Кривцова О. Н., Андреещенко В. А., Панин Е. А., Франц Ю. Ю. Коррозия арматурного проката в постпрокатный период: причины и способы его защиты // Труды университета. – 2018. – № 3 (72). – С. 93–96. EDN: YLXYQX.

20. Казаков В. А., Попов В. А., Косач А. Ф. Атмосферная коррозия арматуры в железобетонных конструкциях // Архитектура, строительство, транспорт: материалы Международной научно-практ. конференции (к 85-летию ФГБОУ ВПО «СибАДИ»), Омск, 02–03 декабря 2015 года. – Омск: СибАДИ, 2015. – С. 275–280. EDN: VMRSQZ.

Информация об авторах:

Огурцов Глеб Леонидович – ассистент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, ogurtsov_gl@spbstu.ru.

Ермошин Николай Алексеевич – доктор военных наук, профессор Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, ermoshin_na@spbstu.ru.

Статья поступила в редакцию 24.01.2024, одобрена после рецензирования 10.09.2024, принята к публикации 12.09.2024.



МОРСКИЕ ПОРТЫ 44

*Прогноз грузооборота:
эконометрическая модель.*

РЕГИОНАЛЬНАЯ ЛОГИСТИКА 54

*Транспортно-складские комплексы:
пространственная модель
и ее влияние на развитие регионов.*



МУНИЦИПАЛЬНЫЕ МАРШРУТЫ 61

Методика для электробусов.

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА



ПРИГОРОДНЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ТРАНСПОРТ 69

Методология классификации.

ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ 76

*Составность и анализ связанных
с ней факторов, влияющих на
энергопотребление.*



ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ 84, 94, 104

*Разработка стратегий
авиакомпаний.*

*Составляющие себестоимости
и модель их влияния на изменения
тарифов.*

*Цифровые перспективы развития
авиаперевозок.*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 338.27:656.07

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-6>

Эконометрическая модель прогноза грузооборота морских портов



Марина БОТНАРЮК



Наталья КСЕНЗОВА

*Марина Владимировна Ботнарюк¹,
Наталья Николаевна Ксензова²*

*^{1, 2} Государственный морской университет
имени адмирала Ф. Ф. Ушакова
(ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова), Новороссийск, Россия.*

*¹ ORCID: 0000-0001-6570-9561; РИНЦ SPIN-код:
9134-4799; РИНЦ Author ID: 760991.*

*² ORCID: 0000-0003-1172-5675; РИНЦ SPIN-код:
3166-8695; РИНЦ Author ID: 887997.*

✉ ¹ mia-marry@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Морской порт, являясь сложной экономической системой, обеспечивает потребности экономики страны в морских перевозках. Находясь в тесном взаимодействии с железнодорожным и автомобильным транспортом, морские порты принимают активное участие в решении задачи доставки грузов до конечного потребителя. Также морские порты принимают участие в пополнении бюджета страны и развивают торговые отношения государства, укрепляя его статус на мировой арене. В этой связи одной из важнейших задач является прогнозирование грузооборота морских портов.

Цель исследования состоит в построении и обосновании модели прогноза результативности деятельности морских портов, отражающей зависимость грузооборота портовой отрасли от основных макроэкономических показателей.

Объект данного исследования – российские морские порты. Для проведения исследования использованы анализ,

синтез, контент-анализ научной литературы и статистических данных, в том числе, отраслевых, за ряд лет, что обосновывает достоверность полученных результатов. При построении эконометрической модели использовались методы корреляционного и дисперсионного анализа, наименьших квадратов.

Новым для данного исследования является применение в качестве модели прогноза грузооборота морских портов системы рекурсивных уравнений, в которой определяющими факторами грузооборота как результативного признака являются лаговые зависимые переменные за предыдущий период.

Разработанная эконометрическая модель может быть использована для краткосрочного прогнозирования грузооборота морской портовой отрасли, а также для оценки ее зависимости от состояния и уровня развития внешнеэкономической деятельности и экономики страны в целом

Ключевые слова: портовая отрасль, грузооборот, эконометрическая модель, система рекурсивных уравнений, авторегрессия с распределенными лагами, краткосрочное прогнозирование.

Для цитирования: Ботнарюк М. В., Ксензова Н. Н. Эконометрическая модель прогноза грузооборота морских портов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-6>.

**Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.**

ВВЕДЕНИЕ

Проблема функционирования экономических систем в условиях неопределенности и нестабильности внешней среды всегда считалась одной из ключевых в области стратегического планирования. В этой связи в течение ряда десятилетий многие исследователи посвящают свои труды решению задачи создания моделей прогнозирования развития как национальной и мировой экономики, так и отдельных бизнес-единиц. Например, в работе [1] отражены вопросы построения моделей прогноза экономических индикаторов, без которых сложно определить траекторию стратегического планирования предприятия. Такие ученые, как В. А. Крюков и др. [2] занимаются проблемными вопросами средств макроэкономического, межрегионального и межотраслевого анализа и прогнозирования. Однако, на наш взгляд, данные модели не в полной мере учитывают специфику отдельных отраслей народного хозяйства, что в некоторых обстоятельствах является одним из важнейших критериев отбора модели. В этой связи интересной представляется модель, предложенная Т. Л. Самковым, который выявил зависимость прогноза валового внутреннего продукта от суммарного воздействия объемов и стоимости деривативов биржевых сделок на продажу важнейших топливно-энергетических товаров и сырья [3].

Особую значимость для развития российской экономики, а также внутренней и внешней торговли представляет транспортная отрасль и, в частности, отрасль морского транспорта, обеспечивающая потребности народного хозяйства в перевозках. Исследования, проведенные коллективом авторов [4–6], наглядно показывают взаимосвязь мировой торговли и морского транспорта, что обосновывает необходимость построения моделей, с помощью которых появляется возможность прогнозирования грузооборота и, соответственно, планирования работы транспортной системы в зависимости от ключевых макроэкономических факторов. Зависимость объемов морской торговли от развития как национальной, так и мировой экономики также отражена в работах многих отечественных и зарубежных исследователей [7–9].

В этой связи представляет интерес научная статья [10], которая посвящена вопросам построения логистических моделей транспортировки нефти. Анализ научных публикаций,

посвященных данной тематике, показал большое разнообразие подходов и методов, применяемых при разработке прогнозов развития морских перевозок и грузовой базы морских портов. Например, Ю. М. Краковский и Т. Давааням занимаются комплексным прогнозированием базовых показателей перевозочного процесса [11]. В работе [12] при прогнозировании базовых показателей перевозочного процесса применяется сценарный подход. Другие авторы предлагают создавать гибридные системы моделей прогнозирования, а также интеллектуальные модели, в том числе искусственные нейронные сети [13]. Исследования Д. А. Мачерета и Р. А. Титова ориентированы на получение результатов в стратегическом планировании развития интермодальной транспортной инфраструктуры [14]. Также для моделирования и прогнозирования спроса на грузовые перевозки [15] и показателей экспорта товаров Российской Федерации [16] многие авторы используют эконометрические модели. Особенности прогнозирования многомерных нестационарных временных рядов с использованием нейромоделирования представлены в работе [17]. Широкое применение в прогнозировании развития морского транспорта получили методы эконометрического моделирования в работах зарубежных авторов [18–19].

Обобщив изложенное выше, авторами поставлена *цель* – построить эконометрическую модель, которая будет отражать зависимость грузооборота морских портов от основных макроэкономических показателей, характеризующих развитие экономики страны.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем исследовании построена эконометрическая модель зависимости грузооборота морских портов от основных макроэкономических показателей, характеризующих развитие экономики страны. В качестве таких показателей рассматривались объем промышленного производства России (ОПП), внешнеторговый оборот страны (ВТО), показатели добычи и экспорта нефти, индекс промышленного производства (ИПП), а также мировая цена на нефть и объемы мировых морских перевозок грузов.

Информационную базу настоящего исследования составили данные Федеральной службы государственной статистики, Ассоциации морских торговых портов, а также



Таблица 1

Матрица парных коэффициентов корреляции [составлено авторами]

	Грузо-оборот портов	ВТО	Мировая цена на нефть	Морские перевозки	Объем добычи нефти	Экспорт нефти	ИПП	ОПП
Грузооборот портов	1							
ВТО	0,78006	1						
Мировая цена на нефть	0,39046	0,61031	1					
Объем морских перевозок	0,98732	0,35628	0,46302	1				
Объем добычи нефти	0,80778	0,79408	0,59408	0,88856	1			
Экспорт нефти	0,77895	0,93061	0,91431	0,53733	0,69191	1		
ИПП	-0,25629	-0,23199	-0,16080	-0,24581	-0,27402	-0,15166	1	
ОПП	0,76810	0,87829	0,51883	0,46517	0,89420	0,40410	-0,17434	1

данные конференции ООН по торговле и развитию UNCTAD за период с 2000 по 2022 год. Временной интервал продолжительностью 23 года является вполне достаточным для получения достоверных результатов моделирования. В таблице 1 представлена матрица парных коэффициентов корреляции.

На основе анализа приведенных коэффициентов парной и межфакторной корреляции выявлены зависимости между показателями. Установлена тесная связь между грузооборотом портов и внешнеторговым оборотом, коэффициент корреляции составил 0,78006; между грузооборотом и объемами мировых морских перевозок, теснота связи которых – 0,93061. В то же время явно прослеживается сильная взаимосвязь между внешнеторговым оборотом и объемами промышленного производства и экспорта нефти.

В результате в качестве эконометрической модели прогноза грузооборота морских портов предварительно может быть предложена система рекурсивных уравнений вида:

$Y_1 = f(X_1, X_2),$ (1)

$Y_2 = f(Y_1, X_3),$ (2)

где Y_1 – внешнеторговый оборот, млрд долл., рассматривается как зависимая (эндогенная) переменная от объемов промышленного производства и экспорта нефти;

Y_2 – грузооборот морских портов, млн тонн, рассматривается как зависимая (эндогенная) переменная от показателя внешнеторгового оборота и объема мировых морских перевозок.

X_1 – объем промышленного производства, млрд долл., независимая (экзогенная) переменная;

X_2 – годовой объем экспорта нефти, млрд долл., независимая (экзогенная) переменная;

X_3 – объем мировых морских перевозок грузов, млн тонн, независимая (экзогенная) переменная.

В итоге предложенная система зависимостей представляет собой систему рекурсивных уравнений, в которой эндогенная переменная Y_2 включает в качестве фактора зависимую переменную Y_1 наряду с независимыми переменными X_1 , X_2 и X_3 . Так как исходные данные представляют собой временные ряды, требуется их проверка на стационарность. В случае нестационарного временного ряда его необходимо привести к стационарному виду, устранив из уровней ряда циклическую составляющую (при ее наличии) и исключив тенденцию. В системе каждое уравнение рассматривается как самостоятельное уравнение регрессии и его параметры оцениваются методом наименьших квадратов. Процесс моделирования сопровождается оценкой качества и значимости как параметров полученной модели, так и всей эконометрической модели в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При моделировании взаимосвязей рядов динамики должно выполняться требование их стационарности, то есть в них должны отсутствовать тенденция и циклические колебания. Визуальный анализ графиков исходных данных, представленных на рис. 1–5, определение коэффициентов автокорреляции уровней ряда динамики позволяют сделать

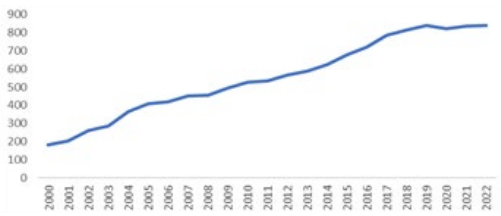


Рис. 1. Динамика грузооборота морских портов России за период 2000–2022 гг. [составлено авторами по: Морские вести России. [Электронный ресурс]: <https://morvesti.ru>. Доступ 10.10.2023].

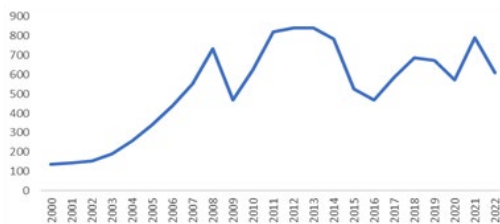


Рис. 2. Динамика внешнеторгового оборота России за период 2000–2022 гг. [составлено авторами по: Мировой импорт товаров и услуг: 1970–2023. [Электронный ресурс]: <http://global-finances.ru>. Доступ 10.10.2023].

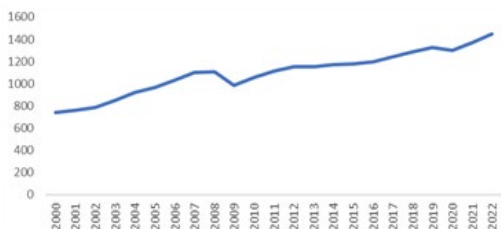


Рис. 3. Динамика объемов промышленного производства России за период 2000–2022 гг. [составлено авторами по: Мировой импорт товаров и услуг: 1970–2023. [Электронный ресурс]: <http://global-finances.ru>. Доступ 10.10.2023].

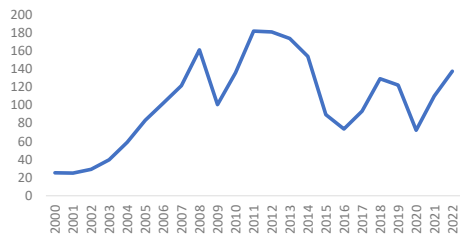


Рис. 4. Динамика объемов экспорта нефти за период 2000–2022 гг. [составлено авторами по: Мировой импорт товаров и услуг: 1970–2023. [Электронный ресурс]: <http://global-finances.ru>. Доступ 10.10.2023].

вывод о наличии тенденции во всех рассматриваемых рядах.

Далее представлена динамика внешнеторгового оборота России, показателей ОПП и экспорта нефти, а также объемов мировых морских перевозок за период 2000–2022 гг.

Наличие тенденции подтверждают также представленные в таблице 2 автокорреляционные функции уровней динамических рядов.

Самые высокие значения коэффициентов автокорреляции первого порядка свидетельствуют, во-первых, о наличии тенденции в рядах динамики рассматриваемых показателей и, во-вторых, об отсутствии в них периодических колебаний. Тенденция в рядах динамики может служить причиной присутствия так называемой ложной корреляции между исследуемыми показателями. Влияние фактора времени будет отражаться в корреляционной зависимости между значениями

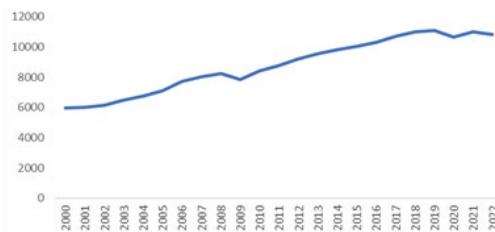


Рис. 5. Динамика объемов мировых морских перевозок за период 2000–2022 гг. [составлено авторами по: Морские вести России. [Электронный ресурс]: <https://morvesti.ru>. Доступ 10.10.2023].

случайных ошибок ϵ_t , представленной в виде коэффициентов автокорреляции в остатках. Поэтому требуется дополнительная оценка как наличия и силы взаимосвязи, так и значимости и достоверности полученных результатов моделирования.

При построении эконометрической модели выполненная проверка показала, что урав-

Таблица 2

Автокорреляционные функции рядов динамики [составлено авторами]

Лаг	Коэффициенты автокорреляции уровней ряда динамики				
	Грузооборот портов (Y_t)	Внешнеторговый оборот (Y_t)	Объем промышленного производства (X_t)	Экспорт нефти (X_t)	Мировые морские перевозки (X_t)
1	0,994781	0,833217	0,971767	0,786571	0,989384
2	0,987086	0,694483	0,934653	0,525941	0,978356
3	0,973855	0,577053	0,918512	0,386775	0,965031
4	0,96252	0,435739	0,896265	0,208981	0,96001
5	0,957859	0,304595	0,865891	0,032208	0,958601



Таблица 3

Параметры и показатели построения OLS-модели [составлено авторами]

Корреляционный анализ					
Коэффициент множественной корреляции (R)					0,969321
Индекс множественной детерминации (R²)					0,939583
Скорректированный индекс множественной детерминации (\widehat{R}^2)					0,933542
Стандартная ошибка переменной Y					60,431017
Число наблюдений					23
Дисперсионный анализ					
	Число степеней свободы	Дисперсия	Дисперсия на одну степень свободы	Расчетный F-критерий Фишера	Расчетный уровень значимости F-критерий Фишера
Факторная регрессия	2	1135882,596	567941,297	155,519	6,47918E-13
Остаточная регрессия	20	73038,157	3651,907		
Общая регрессия	22	1208920,753			
Регрессионный анализ					
	Параметры уравнения регрессии	Стандартная ошибка переменной	Расчетный t-критерий Стьюдента	Расчетный уровень значимости t-критерия Стьюдента	
Результативная переменная Y ₁	-275,493989	75,860589	-3,631582	0,001661791	
Факторная переменная X ₁	0,406330	0,082354	4,933921	8,00174E-05	
Факторная переменная X ₂	3,465934	0,329692	10,512613	1,35614E-09	

нения системы являются идентифицируемыми. В этой связи для решения в настоящей статье будет использован двухшаговый метод наименьших квадратов. В качестве модели зависимости внешнеторгового оборота от объемов промышленного производства и экспорта нефти выбрана OLS-модель [22]:
$$Y_i = a + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2}, \tag{3}$$
где a , b_1 и b_2 – параметры уравнения регрессии.

Модель решается средствами Microsoft Excel. Параметры и показатели построения OLS-модели приведены в таблице 3.

По критерию Стьюдента и F-критерию Фишера, расчетные значения которых превышают их табличные значения, и высокому значению индекса детерминации можно утверждать, что данное уравнение множественной регрессии достоверно описывает зависимость исследуемых показателей.

Таким образом, регрессионная модель зависимости показателя внешнеторгового оборота от объема промышленного производства и экспорта нефти принимает вид:
$$Y_i = -275,494 + 0,4063X_{i1} + 3,4659X_{i2} + \varepsilon_i \tag{4}$$

Применение метода наименьших квадратов предполагает соблюдение определенных требований – предпосылок МНК относительно случайной величины ε_i :

- случайность колебаний остатков, которые представляют собой временной ряд уровней остаточной последовательности;
- математическое ожидание (средняя величина) остатков ε_i равно нулю;
- остатки временного ряда должны быть гомоскедастичны, то есть должна быть одинаковая дисперсия ε_i для всех переменных x_i ;
- в остатках ε_i должна отсутствовать автокорреляция;
- распределение остатков должно подчиняться нормальному закону распределения.

Данные для проверки предпосылок МНК приведены в таблице 4.

На рис. 6 представлен график зависимости случайных ошибок ε_i от расчетного $\widehat{Y}_{i(\lambda)}$ с целью проверки первого требования МНК.

Визуальный анализ корреляционного поля остатков ε_i , которые расположились в границах горизонтальной линии, является доказательством случайности отклонений остатков,

Таблица 4

Определение случайных остатков ε_i для Y_i [составлено авторами]

Наблюдение	Фактическое Y_i	Теоретическое $Y_{i(x)}$	Остатки ε_i	Наблюдение	Фактическое Y_i	Теоретическое $Y_{i(x)}$	Остатки ε_i
1	136,9	111,9642	24,9357	13	842	818,7929	23,2070
2	141,8	119,6901	22,1099	14	842,2	795,4992	46,7008
3	152,9	143,5354	9,36458	15	784,4	734,9523	49,4476
4	191	208,4498	-17,4497	16	526,4	513,0122	13,3877
5	257,1	303,301	-46,2009	17	468,1	466,6123	1,4876
6	340,2	406,9176	-66,7175	18	585,1	552,758	32,3419
7	439,1	497,0251	-57,9251	19	688,1	694,6048	-6,5047
8	551,7	592,066	-40,3659	20	672	688,1707	-16,1707
9	734,7	732,1343	2,5657	21	572,6	504,018	68,5819
10	469	474,2153	-5,2153	22	789,4	662,9137	126,4862
11	625,1	625,4944	-0,3943	23	611	790,6586	-179,6585
12	822,5	806,5141	15,9858	Сумма			2,50111E-12

следовательно, первое требование-предпосылка МНК выполняется – расчетные значения результирующего показателя «внешний торговый оборот» хорошо аппроксимируют его эмпирические величины.

Второе требование метода наименьших квадратов относительно математического ожидания остатков означает, что $\sum(Y_i - Y_{i(x)})^{20} = 0$. Сумма остатков для исследуемой зависимости составила 2,50111E-12, практически равна нулю, значит, вторая предпосылка оправдана.

Третье требование метода наименьших квадратов (гомоскедастичность остатков) также выполняется, что следует из того же графика, приведенного на рис. 6. На графике остатки ε_i расположились вдоль прямой линии (оси $Y_{i(x)}$), что является явным признаком гомоскедастичности.

Четвертая предпосылка метода наименьших квадратов об отсутствии автокорреляции остатков, то есть об отсутствии зависимости между отдельными уровнями динамического ряда остатков, подтверждает состоятельность и эффективность найденных параметров уравнения регрессии. Так как построение эконометрической модели производится по рядам динамики, которые, как правило, содержат тенденцию (зависимость последующего уровня ряда динамики от предыдущего), выполнение данной предпосылки обязательно при проведении соответствующих исследований. Поэтому в работе использованы два теста проверки автокорреляции остатков – построение автокорреляционной функции и применение теста Дарбина-Уотсона. Средствами Microsoft Excel расче-

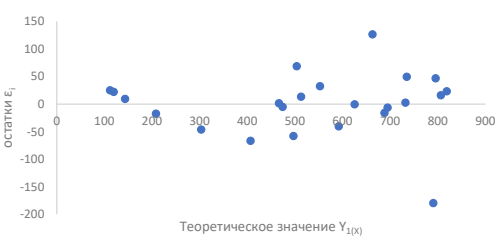


Рис. 6. График зависимости остатков ε_i от $Y_{i(x)}$ [составлено авторами].

таны коэффициенты автокорреляции остатков (автокорреляционная функция) уравнения регрессии, значения которых приведены в таблице 5.

Низкие значения показателей позволяют сделать вывод: автокорреляция остатков в рассмотренном линейном уравнении множественной регрессии отсутствует.

Убедиться в отсутствии автокорреляции остатков дает возможность критерий Дарбина-Уотсона. Для его применения произведен расчет величины d по формуле:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \tag{5}$$

Для рассчитанного уравнения множественной регрессии фактическая величина критерия Дарбина-Уотсона составила: $d = 40760,95/19862,86 = 2,052$.

Сопоставление расчетного значения с критическими дает возможность сделать вывод об отсутствии автокорреляции. Таким образом, четвертая предпосылка МНК подтверждается.

В соответствии с пятой предпосылкой МНК остатки подчиняются нормальному



Автокорреляционная функция остатков Y_1 [составлено авторами]

Название показателя	Значение
коэффициент автокорреляции 1-го порядка	-1,8Е-05
коэффициент автокорреляции 2-го порядка	-0,14941
коэффициент автокорреляции 3-го порядка	0,20467
коэффициент автокорреляции 4-го порядка	0,093643
коэффициент автокорреляции 5-го порядка	-0,27394

закону распределения, что позволяет проводить проверку параметров регрессии и корреляции на основе критериев Стьюдента и Фишера. Построенное уравнение регрессии отвечает требованиям пятой предпосылки (данные таблицы 3).

Качество построенного уравнения регрессии оценивается также средней ошибкой аппроксимации – средним отклонением расчетных значений $Y_{(x)}$ от их фактических значений Y_i , определяется по формуле:

$$A = \frac{1}{n} \sum \frac{|Y_i - Y_{(x)}|}{Y_i} \tag{6}$$

Для найденного уравнения регрессии средняя ошибка аппроксимации составила 8,45 %, что говорит о хорошем подборе уравнения к исходным данным.

Полученные результаты оценки параметров регрессии и показателей корреляции, уравнения регрессии в целом признаются статистически значимыми и надежными, а построенное уравнение хорошо аппроксимирует исследуемую зависимость.

На втором этапе построения эконометрической модели рекурсивных уравнений регрессии определяется зависимость грузооборота морских портов от показателей внешнего товарооборота страны и мировых морских перевозок. В качестве модели зависимости также было использовано линейное уравнение множественной регрессии. Полученные результаты моделирования, предварительная оценка параметров регрессии по t -критерию Стьюдента и F -критерию Фишера указывали на их статистическую значимость. На основании рассчитанного уравнения регрессии были определены теоретические значения результативного признака (показателя грузооборота), рассчитаны остатки уравнения и определены коэффициенты автокорреляции остатков.

Но при положительных результатах оценки статистической значимости были получены высокие значения коэффициентов автокорреляции, которые свидетельствовали

о наличии в остатках зависимости уровней ряда, то есть наличие автокорреляции остатков уравнения регрессии, что недопустимо при эконометрическом моделировании взаимосвязей динамических рядов.

В связи с этим в работе авторами в качестве модели зависимости предлагается рассмотреть авторегрессионную модель с распределенными лагами ADLM, которая позволяет учитывать воздействие уровней динамических рядов, сформированных в предыдущие периоды. Путем экспериментальных расчетов на основе сравнительной оценки критериальных показателей определено итоговое уравнение авторегрессии, общий вид которого следующий:

$$Y_2 = Y_{2(t-1)} + Y_{1(t-1)} + X_3 + \varepsilon, \tag{7}$$

где $Y_{2(t-1)}$ – грузооборот морских портов в период времени $t-1$;

$Y_{1(t-1)}$ – внешний товарооборот в период времени $t-1$.

Результаты расчетов и статистической оценки уравнения авторегрессии с распределенным лагом приведены в таблице 6.

Следовательно, ADLM-модель для прогнозирования грузооборота морских портов принимает вид:

$$Y_2 = -143,9483 + 0,6495Y_{2(t-1)} + 0,0673Y_{1(t-1)} + 0,0449X_3 + \varepsilon. \tag{8}$$

Адекватность построенной модели зависимости исследуемых показателей подтверждается проверкой значимости параметров уравнения регрессии и уравнения в целом t -критерием Стьюдента и F -критерием Фишера.

Построенное уравнение авторегрессии с распределенными лагами также должно отвечать пяти предпосылкам МНК. Для проведения проверки в таблице 7 приведен расчет остатков данного уравнения.

Низкие значения коэффициентов автокорреляции, приведенные в таблице 8, говорят об отсутствии автокорреляции в остатках построенного уравнения авторегрессии для Y_2 .

Таблица 6

Параметры и показатели построения ADLM-модели [составлено авторами]

Корреляционный анализ					
Коэффициент множественной корреляции (R)			0,996994		
Индекс множественной детерминации (R ²)			0,993998		
Скорректированный индекс множественной детерминации (\bar{R}^2)			0,992997		
Стандартная ошибка переменной Y			16,965676		
Число наблюдений			22		
Дисперсионный анализ					
	Число степеней свободы	Дисперсия	Дисперсия на одну степень свободы	Расчетный F-критерий Фишера	Расчетный уровень значимости F-критерий Фишера
Факторная регрессия	3	858067,220	286022,407	993,705	3,55112E-20
Остаточная регрессия	18	5181,015	287,834		
Общая регрессия	21	863248,240			
Регрессионный анализ					
	Параметры уравнения регрессии	Стандартная ошибка переменной	Расчетный t-критерий Стьюдента	Расчетный уровень значимости t-критерия Стьюдента	
Результативная переменная Y ₂	-143,948359	59,396017	-2,423535	0,026131	
Факторная лаговая переменная Y _{2(t-1)}	0,649551	0,101800	6,380610	5,218E-06	
Факторная лаговая переменная Y _{1(t-1)}	0,067330	0,025066	2,686071	0,015091	
Факторная переменная X ₃	0,044959	0,013255	3,391929	0,003249	

Таблица 7

Определение случайных остатков ϵ_i для Y₂ [составлено авторами]

Наблю- дение	Фактическое Y _i	Теоретическое Y _{xi}	Остатки ϵ_i	Наблю- дение	Фактическое Y _i	Теоретическое Y _{xi}	Остатки ϵ_i
1	203,7	235,5762	-31,8763	13	589	595,9448	-6,9448
2	260,8	253,5400	7,2599	14	623,4	628,3191	-4,9191
3	286	303,9349	-17,9349	15	676,7	677,2517	-0,5517
4	364	328,3520	35,6479	16	721,9	726,8583	-4,9583
5	406,9	389,2027	17,6972	17	787	766,6391	20,3608
6	421	436,9808	-15,9808	18	816,5	814,9832	1,5167
7	451	453,5747	-2,5747	19	840,3	839,3204	0,9795
8	454,6	469,5070	-14,9070	20	820,8	842,4992	-21,6992
9	496,4	473,0549	23,3450	21	835,2	830,6121	4,5878
10	525,9	514,4688	11,4311	22	841,5	845,0535	-3,5535
11	535,4	537,1996	-1,7996				
12	565,5	560,6258	4,8741	Сумма			2,558E-12

Для проверки первой предпосылки МНК строится график зависимости остатков ϵ_i от теоретических значений Y₂ (рис. 7).

Визуальный анализ графика дает возможность сделать вывод о выполнении первой предпосылки МНК. Вторая предпосылка –

нулевая средняя величина остатков также оправдана, так как сумма отклонений теоретических значений Y₂ от его фактических уровней практически равна нулю: $\sum(Y_i - Y_{xi}) = 2,558E-12$.

Выполнение третьей предпосылки МНК – гомоскедастичность остатков – также под-



Автокорреляционная функция остатков Y2 [составлено авторами]

Название показателя	Значение
коэффициент автокорреляции 1-го порядка	−0,1927
коэффициент автокорреляции 2-го порядка	−0,0028
коэффициент автокорреляции 3-го порядка	−0,07455
коэффициент автокорреляции 4-го порядка	−0,0523
коэффициент автокорреляции 5-го порядка	0,066453

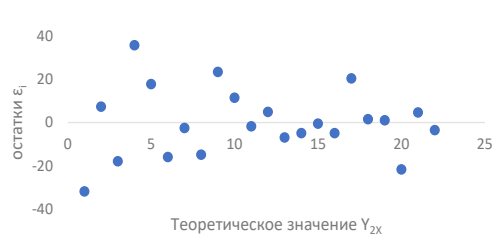


Рис. 7. График зависимости остатков ε_i от Y_{2x} [составлено авторами].

тверждается графиком остатков уравнения авторегрессии (рис. 7).

На основе данных таблицы 6 проверяется пятая предпосылка МНК – остатки уравнения авторегрессии подчиняются нормальному закону распределения, что подтверждается тестированием по *t*-критерию Стьюдента и *F*-критерию Фишера.

Для уравнения авторегрессии также рассчитана средняя ошибка аппроксимации, которая составила 2,9 %, что говорит о хорошем качестве подобранной модели исследуемой зависимости.

В результате проведенного исследования эконометрическая модель прогнозирования грузовой базы морских портов может быть представлена следующей системой рекурсивных уравнений:

$$Y_1 = -275,494 + 0,4063X_1 + 3,4659X_2 + \varepsilon, \quad (10)$$

$$Y_2 = -143,9483 + 0,6495Y_{2(t-1)} + 0,0673Y_{1(t-1)} + 0,0449X_3 + \varepsilon. \quad (11)$$

В соответствии с экономической интерпретацией параметров уравнения регрессии установлена следующая зависимость между показателями первого уравнения системы: увеличение объема промышленного производства страны на 1 млрд долл. приводит к росту внешнеторгового оборота в среднем на 0,4063 млрд долл. в год; годовой рост экспорта нефти на 1 млрд долл. обеспечивает среднегодовой абсолютный прирост внешнеторгового оборота на 3,4659 млрд долл.

Наличие в системе уравнения авторегрессии с лаговыми переменными означает зави-

симость результативного признака от предыдущих значений факторных переменных модели, выраженную в значениях коэффициентов регрессии:

– грузооборот морских портов увеличится в среднем за год на 649,5 тыс. тонн под воздействием своего же роста непосредственно в предшествующий год на 1 млн тонн;

– годовой рост внешнеторгового оборота страны на 1 млрд долл. в момент времени (*t* – 1) обеспечивает средний абсолютный прирост грузооборота морских портов в последующий год в размере 67,3 тыс. тонн;

– рост мировых перевозок грузов на 1 млн тонн в год положительно влияет на объемы перевалки грузов в российских портах, увеличивая их в среднем на 44,9 тыс. тонн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования был проведен анализ динамики грузооборота морских портов России, основных макроэкономических показателей – объемов внешнеторгового оборота и промышленного производства, экспорта нефти и объемов мировых перевозок грузов и выявлены взаимосвязи между ними за период с 2000 по 2022 год. На основании полученных данных установлены основные факторы, определяющие в данном случае величину грузооборота, и разработана эконометрическая модель прогноза грузооборота морских портов, которая представляет собой систему рекурсивных уравнений. Отличительная особенность модели состоит в том, что она позволяет не только представить краткосрочный прогноз величины грузооборота морских портов, но и оценить зависимость портовой отрасли от состояния национальной экономики и ее внешнеэкономической деятельности.

Полученная эконометрическая модель прошла оценку на тесноту связи между показателями, на значимость и надежность параметров регрессии и уравнений регрессии в целом. Кроме этого, осуществлена про-

верка модели на выполнение предпосылок метода наименьших квадратов, которая также подтвердила хорошее качество построенной модели.

Применение представленной модели на практике позволит на основании прогноза грузовой базы решать такие задачи, как пополнение торгового флота, обоснование актуальности инвестирования в основные производственные фонды портовой инфраструктуры. На основе полученных данных представляется уникальная возможность принятия стратегически важных для отрасли и экономики страны решений, касающихся пропускной способности береговой составляющей, использования портовых мощностей, а также прогнозирования занятости трудовых ресурсов, что позволит своевременно принимать превентивные меры в случае возникновения такой необходимости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Андрукович П. Ф. Заметки о принципах построения моделей прогноза экономических показателей (на примере прогнозной системы «ProRosEc») // Экономика и математические методы. – 2020. – Т. 56. – № 2. – С. 66–76. EDN: MWIIVQ.
2. Крюков В. А., Баранов А. О., Павлов В. Н., Суслов В. И., Суслов Н. И. Проблемы развития единого комплекса средств макроэкономического межрегионального межотраслевого анализа и прогнозирования // Экономика региона. – 2020. – Т. 16. – Вып. 4. – С. 1072–1086. DOI: 10.17059/ekon.reg.2020-4-5.
3. Самков Т. Л. Модель прогноза валового внутреннего продукта России в зависимости от финансовых инструментов торговли энергетическими и сырьевыми товарами // Проблемы региональной энергетики. – 2018. – № 1 (36). – С. 136–151.
4. Бабурина О. Н., Кузнецова Г. В., Подбиралина Г. В., Хекерт Е. В. Мировая торговля и международные морские перевозки в условиях новых геоэкономических рисков // Общественные науки и современность. – 2022. – № 3. – С. 50–66. EDN: EWNTXM.
5. Бабурина О. Н., Кондратьев С. И., Кузнецова Г. В. Мегатренды развития морского транспорта // Век глобализации. – 2022. – № 3 (43). – С. 72–86. EDN: AUHBJO.
6. Grass, E. Yu., Lepekhina, Yu. A. A system of measures to achieve the efficiency of the production processes of the enterprise. 11th International Scientific and Practical Conference CILDIAH-2022, 2023, Vol. 164, 00008. DOI: 10.1051/shsconf/202316400008.
7. Ивин Е. А., Горячева А. С., Курбацкий А. Н. Анализ состояния и перспективы развития грузопотоков через морские порты России // Проблемы развития территории. – 2020. – № 2 (106). – С. 62–80. DOI: 10.15838/pid.2020.2.106.5.
8. Глебкова И. Ю., Качанова Н. Н. Факторный анализ показателей внешней торговли // Евразийский союз ученых. – 2015. – № 2 (11). – С. 56–59. EDN: XERELP.
9. Yu Xiao, Zhezhi Jin. The Forecast Research of Linear Regression Forecast Model in National Economy. Open Access Library Journal. 2021, Vol. 8, Iss. 8, e7797. DOI: 10.4236/oalib.1107797.
10. Kurenkov, P. V., Astafyev, A. V., Kolos, L. E., Chebotareva, E. A., Solop I. A., Denisenko, T. V. Development of logistics models for oil cargo transportation to reduce logistics costs and improve wagon mileage. Lecture Notes in Networks and Systems. 2022, Vol. 364, pp. 219–235. EDN: BNPVWS.
11. Краковский Ю. М., Давааням Т. Комплексное прогнозирование базовых показателей перевозочного процесса // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 3 (51). – С. 179–184. EDN: WMELEL.
12. Краковский Ю. М., Лузгин А. Н. Прогнозирование базовых показателей перевозочного процесса на основе сценарного подхода // Прикладная информатика. – 2017. – Т. 12. – № 2 (68). – С. 29–36. EDN: WCFIHO.
13. Киселенко А. Н., Сундуков Е. Ю., Тарабукина Н. А. Методы прогнозирования развития транспортных систем в современных условиях // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. – № 3 (100). – С. 40–49. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-5.
14. Мачерет Д. А., Титов Р. А. Стратегическое планирование и экономическая оценка развития интермодальной транспортной инфраструктуры // Мир транспорта. – 2020. – Т. 18. – № 6. – С. 30–45. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-6-30-45.
15. Щербанин Ю. А., Ивин Е. А., Курбацкий А. Н., Глазунова А. А. Эконометрическое моделирование и прогнозирование спроса на грузовые перевозки в России в 1992–2015 гг. // Научные труды. Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН. – 2017. – Том 15. – С. 200–217.
16. Ширнаева С. Ю. Эконометрическое моделирование и прогнозирование показателей экспорта товаров Российской Федерации // Фундаментальные исследования. – 2020. – № 6. – С. 172–177. – 2020. – № 6. – С. 172–177. [Электронный ресурс]: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42796>. Доступ 09.10.2023.
17. Епихин А. И., Кондратьев С. И., Хекерт Е. В. Прогнозирование многомерных нестационарных временных рядов с использованием нейромоделирования // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4-4 (50). – С. 23–27. EDN: ZPZCJ.
18. Chien-Chang, Chou; Ching-Wu, Chu; Gin-Shuh, Liang. A modified regression model for forecasting the volumes of Taiwan's import containers. Mathematical and Computer Modelling, 2008, Vol. 47, Iss. 9–10, pp. 797–807. DOI: 10.1016/j.mcm.2007.05.005/.
19. Eskafi, M., Kowsari, M., Dastgheib, A. et al. A model for port throughput forecasting using Bayesian estimation. Maritime Economics & Logistics, 2021, Vol. 23, pp. 348–368. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41278-021-00190-x>. ●

Информация об авторах:

Ботнарюк Марина Владимировна – доктор экономических наук, доцент, профессор кафедры экономической теории, экономики и менеджмента Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова (ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова), Новороссийск, Россия, tiia-marry@mail.ru.

Ксензова Наталья Николаевна – кандидат экономических наук, доцент, заведующий кафедрой экономической теории, экономики и менеджмента Государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова (ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова), Новороссийск, Россия, natksenzova@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 20.11.2023, одобрена после рецензирования 26.02.2024, принята к публикации 28.02.2024.





Оценка влияния пространственной модели терминально-складских комплексов на региональные экономические показатели



Валерий ХАЙТБАЕВ



Евгений ЧЕРНЯЕВ

Валерий Абдурахманович Хайтбаев¹,
Евгений Васильевич Черняев²

¹ Приволжский государственный университет
путей сообщения, Самара, Россия.

² Вольский военный институт материального
обеспечения, Вольск, Россия.

¹ ORCID: 0000-0001-8244-8842; Scopus Author ID:
57207192153; РИНЦ SPIN-код: 6990-4788; РИНЦ
Author ID: 737635.

² ORCID: 0009-0003-9646-5995; РИНЦ SPIN-код:
3339-3490; РИНЦ Author ID: 1197150.

✉ ¹ vhaitbaev21@mail.ru.

✉ ² ki-la@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Цель статьи – оценить влияние пространственной модели терминально-складских комплексов, расположение которых локализовано на территориях индустриальных парков, на региональные экономические показатели.

В статье исследована региональная пространственная модель терминально-складских комплексов (ТСК), функционирующая на площадке индустриального парка (ИП). Обзор зарубежной и отечественной литературы позволил выявить определенный дефицит методов оценки ТСК как инициатора и стимулятора региональной

экономической деятельности. Выявлены потенциальные источники роста экономических показателей региона, обусловленные воздействием пространственного фактора и преимуществами размещения объектов терминально-складских комплексов на площадках (площадях) ИП. Предложены подходы к статистической интерпретации региональных показателей. Их развитие применительно к оценке потенциала ТСК позволит в дальнейшем включать многие показатели регионов с целью анализа экономического влияния ИП.

Ключевые слова: терминально-складская система, индустриальный парк, экономический рост региона, инвестиционная привлекательность, региональное экономическое развитие.

Для цитирования: Хайтбаев В. А., Черняев Е. В. Оценка влияния пространственной модели терминально-складских комплексов на региональные экономические показатели // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 54–60. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-7>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия появилось большое разнообразие грузовых перевозок и логистических объектов. Контейнеризация, «околошоринг», аутсорсинг транспортной и логистической деятельности, совершенствование информационных технологий и международная стандартизация, глобальное снабжение, усиление мер безопасности и защищенности в цепочках поставок, устойчивый транспорт и сокращение жизненного цикла продукции – это лишь некоторые из наиболее важных изменений в логистике и транспортной отрасли, которые существенно влияют на набор и качество услуг, предлагаемых терминально-складскими комплексами (ТСК). За это время изменились способы упаковки, хранения и транспортировки товаров, и поэтому спрос на различные услуги приводит к высоко дифференцированным логистическим решениям, таким как индустриальные парки (ИП). В результате тесные связи между интегрированными логистическими услугами и удовлетворением клиентов приводят не только к первоначальному принятию концепции ИП, но и оправдывает их постоянное развитие.

В настоящее время по всему миру создана развитая система терминально-складских комплексов (внутренние таможенные склады, интермодальные грузовые центры, логистические центры, сухие порты, внутренние и интермодальные терминалы, распределительные центры и другие), которая положительно влияет не только на общее качество транспортных услуг, но и на экономику своих регионов.

Совместно используя свои инфраструктурные и функциональные ресурсы, ИП предлагают как высокое качество и ритмичность транспортных услуг, так и постоянную складскую мощность в режиме реального времени. В связи с тем, что компании тратят много средств, чтобы повысить свою гибкость в условиях постоянно изменчивого спроса на рынках, их главная цель – получить преимущество за счет прямого или косвенного взаимодействия с ИП.

Несмотря на экономические проблемы изменчивой бизнес-среды многие страны уже расширили свои транспортные и логистические услуги, включая в свою транспортную систему как бимодальные, так и тримодальные внутренние терминалы и ИП.

Современные теории регионального развития, которые классифицируются как институциональные теории, опираются на ранее разработанные теории и подчеркивают необходимость поддержки создания преимущественно малых и средних компаний (поскольку малые и средние компании способны быстро реагировать на бизнес-потребности рынка), создавая и изменяя бизнес-климат в регионе. С другой стороны, на развитие региона влияет его социально-экономическая специализация, развитие ИП. В мировой практике ИП прошли несколько этапов развития, и сейчас можно говорить о нескольких поколениях индустриальных парков.

ИП первого поколения, построенные в 1970-х годах, отличаются от других поколений довольно упрощенной архитектурой. В каждом новом поколении она усложнялась, полнее использовалась территория, расширялся портфель услуг, увеличивалось количество административного персонала и работников.

ИП, несомненно, оказывают положительное влияние на бизнес в регионе, где они расположены. Они выгодны тем, что применяют современные технологии и инновации в производственных процессах, при выпуске товаров более высокого класса, кроме того, регион получает прибыль от иностранных компаний, расположенных в парках, поскольку они приносят в регион экономический и инновационный потенциал или хорошо зарекомендовавшие себя на международном уровне ноу-хау и, таким образом, поддерживают процесс реконструкции и модернизации промышленности и одновременно покрытие при необходимости высокого дефицита торгового баланса.

Еще одним положительным моментом существования индустриальных парков является то, что они создают условия для развития малых и средних предприятий и их сотрудничества с субъектами внешнеэкономической деятельности, а значит, положительно влияют на конкурентоспособность, производительность труда и увеличение занятости.

Немаловажно и влияние ИП на общее развитие региона. Очевидно, что от ИП нельзя ожидать немедленных результатов, тем не менее, можно предсказать, что создаваемые рабочие места или передача технологий между компаниями приведут к синергетическому эффекту. Концентрация некоторых видов компаний может привлечь в регион



многих инвесторов, что приведет к необходимости набора новых сотрудников.

Целью данного исследования является выявление влияния потенциала ТСК, сконцентрированного на площадках ИП субъекта Российской Федерации, на экономический рост региона.

Использованы *методы* эмпирического анализа, системный подход, логические, статистические и экономические методы, корреляционный анализ, метод рейтинговых оценок.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ИССЛЕДОВАНИЙ

Многие экономисты глубоко исследовали роль ТСК как генератора экономического роста. Несмотря на то, что существует широкий спектр различных методических исследований о влиянии ТСК на повышение эффективности экономической системы региона, наблюдается заметный дефицит методов оценки ее роли как инициаторов и стимуляторов региональной экономической деятельности. Существующая теоретическая база такого утверждения представляется совершенно недостаточной.

С. Ляпин и соавторы рассматривают теорию «полусовосов роста» в региональной, федеральной и мировой экономике, предлагая активное управление развитием ТСК региона с учетом критериев эффективности. Данный подход учитывает не только развитие ТСК региона, но и социально-экономическое развитие прилегающих к нему субъектов, кроме того, упоминает региональное влияние предприятий, устойчивость которых зависит от работы и производительности ИП [1].

М. Бойл и соавторы провели анализ влияния логистических объектов, в частности «грузовых деревень» на потенциал развития регионов [2].

Основной вопрос, который рассматривают Д. Банистер и Й. Берекман, – способность инвестиций в сфере ИП содействовать экономическому росту на региональном и местном уровнях, дополнительным выгодам для развития. Неспособность точно определить и измерить эти предполагаемые выгоды развития неизбежно приведет к их двойному учету, создавая тем самым риск реализации некорректных проектов ТСК [3].

По мнению Т. Ноттебума и Ж.-П. Родрига, терминалы, ИП и другие логистические объ-

екты стали неотъемлемой частью транспортной системы, особенно в регионах, сильно зависящих от торговли. Развитие ТСК постепенно смещается в регионы из-за сложности современного распределения грузов, повышенного внимания к интермодальным транспортным решениям и проблемам пропускной способности. Задачи снижения загруженности транспортной сети, сокращения потребления энергии и порожних перевозок становятся сильными стимулами для рассмотрения создания и развития региональных ТСК [4]. Локальные грузовые потоки являются результатом глобальных и региональных экономических процессов, направленных на использование основных стратегий «точно в срок» и «от двери до двери». Авторы предположили, что на региональном уровне деятельность, связанная с распределением грузов, может быть изменена с помощью развития и строительства новых ТСК в ответ на рост потребления и спроса, а также необходимость изменения цепочек поставок [4].

В работе [5] отмечается перспективность ТСК в качестве экономических движущих сил регионов. Кроме того, еще одним интересным элементом ИП является их общая независимость от других кластеров и отраслей в сочетании с тем фактом, что большое количество предприятий в различных отраслях экономически базируются на логистических объектах, а иногда и расположены вокруг них [5; 6].

Авторы [7] отмечают, что региональные власти стремятся привлечь ИП, чтобы способствовать экономическому развитию, местному предпринимательству и уровню занятости.

Взаимосвязь между ИП и региональным экономическим развитием представлена в работе [8], в которой отмечается, что создание ИП вносит значительный вклад в создание устойчивой экономики.

Работа [9] направлена на определение ключевых макроэкономических факторов, влияющих на создание ИП, оказывающих положительное влияние на устойчивое региональное развитие.

В исследовании [10], в частности, отмечается нацеленность ИП на расширение интермодальных перевозок.

Авторы [11] изучали возможности улучшения имиджа и конкурентоспособности ИП путем использования современных концепций создания и развития синергии между

Таблица 1

Концентрация занятости в секторе «Транспортировка и хранение»

Субъекты	Удельный вес			
	2020	2021	2022	2023
Российская Федерация	7,4 %	7,6 %	7,77 %	7,82 %
ПФО	6,46 %	6,46 %	6,83 %	7,07 %
Республика Башкортостан	5,49 %	5,53 %	5,84 %	6,19 %
Республика Марий Эл	4,46 %	4,67 %	4,91 %	4,92 %
Республика Мордовия	5,21 %	5,19 %	5,36 %	5,77 %
Республика Татарстан	7,22 %	7,17 %	7,45 %	8,12 %
Удмуртская Республика	5,93 %	5,95 %	6,34 %	6,16 %
Чувашская Республика	3,72 %	3,86 %	4,31 %	4,47 %
Пермский край	7,46 %	7,39 %	7,89 %	7,56 %
Кировская область	5,26 %	5,59 %	6,18 %	6,59 %
Нижегородская область	5,94 %	5,97 %	6,74 %	6,93 %
Оренбургская область	6,60 %	6,56 %	7,52 %	7,64 %
Пензенская область	5,80 %	5,80 %	6,63 %	6,66 %
Самарская область	8,38 %	8,32 %	8,44 %	8,98 %
Саратовская область	7,56 %	7,53 %	7,14 %	7,03 %
Ульяновская область	5,83 %	5,83 %	5,93 %	6,28 %

Источник: Федеральная служба государственной статистики <https://rosstat.gov.ru>.

производственными, промышленными и логистическими фирмами с целью повышения эффективности и устойчивости грузовых и логистических процессов. Все компании на территории ИП могут развивать совместные маркетинговые услуги, в результате чего малые и средние фирмы получают наибольшую выгоду от подобных ситуаций.

В исследовании [12] предлагается развивать кластерные ИП как эффективный метод для повышения конкурентоспособности отраслей и организации рабочих мест.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Параллельно с основной и более широкой ролью ТСК в продвижении интермодальных перевозок существует также дополнительная и не менее важная их роль как инициаторов регионального экономического развития. Площадками для этого являются региональные индустриальные парки, (ИП), которые создают базу для развития экономического, интеллектуального и промышленного потенциала региона, импортозамещения, увеличе-

ния налоговых поступлений в бюджеты всех уровней. Инфраструктура ИП относится к логистической, так как включает в себя склады класса А и В, распределительные центры компаний, маркетплейсов.

ИП выступают движущей силой экономики своих регионов, потенциально влияющей на региональный уровень безработицы, валовой региональный продукт (ВРП) и создание рабочих мест, инвестиционную привлекательность и объемы торговли (региональный импорт/экспорт). Уровень безработицы и ВРП можно охарактеризовать как наиболее характерные экономические показатели регионов. Инвестиционная привлекательность иллюстрирует общую привлекательность внутренних и иностранных инвестиций для каждого региона.

Индустриальные парки обеспечивают превосходную институциональную основу, предоставляют дополнительные услуги и качественную инфраструктуру. Они способствуют привлечению и реализации необходимых инвестиций, увеличению занятости населения,



Динамика ВРП за 2020–2023 годы, млрд руб.

	2020	2021	2021/2020	2022	2022/2021	2023	2023/2022
Российская Федерация	94410,2	121183,0	128,36 %	140670,8	116,08 %	171041	121,59 %
Приволжский Федеральный округ	13655,4	15963,18	116,90 %	19664,6	123,19 %	20188	102,66 %
Кировская область	396,9	452,7	114,06 %	554,6	122,51 %	575,1	103,70 %
Нижегородская область	1600,30	1730,6	108,14 %	2287,9	132,20 %	2390	104,46 %
Оренбургская область	1046,70	1239	118,37 %	1571,4	126,83 %	1500	95,46 %
Пензенская область	484,8	586	120,87 %	592,9	101,18 %	593	100,02 %
Пермский край	1385,40	1400	101,05 %	2002,8	143,06 %	1800	89,87 %
Республика Башкортостан	1694,20	2059,4	121,56 %	2242,6	108,90 %	2544	113,44 %
Республика Марий Эл	198	214	108,08 %	262	122,43 %	247,7	94,54 %
Республика Мордовия	266,4	299,8	112,54 %	342,6	114,28 %	361,5	105,52 %
Республика Татарстан	2631,30	3400	129,21 %	4179,3	122,92 %	4153,7	99,39 %
Самарская область	1625,50	1969,6	121,17 %	2378,5	120,76 %	2800	117,72 %
Саратовская область	856,5	984,8	114,98 %	1194	121,24 %	1300	108,88 %
Удмуртская Республика	684,4	790,68	115,53 %	965,7	122,14 %	956	99,00 %
Ульяновская область	439	484,6	110,39 %	588,8	121,50 %	571	96,98 %
Чувашская Республика	346	352	101,73 %	501,5	142,47 %	396	78,96 %

Источник: Федеральная служба государственной статистики <https://rosstat.gov.ru>.

росту конкурентоспособности, стабильному осуществлению бизнес-стратегий и региональному экономическому развитию. Также они создают среду для использования новых технологий, обучения и инноваций, создания рабочих мест и рынков и, в итоге, консолидации существующих отраслей [13–16].

Расположенные в 72 регионах России индустриальные парки обеспечивают удобный доступ к крупным городским агломерациям и рынкам сбыта продукции. Предприятия, функционирующие в индустриальных парках, являются важными субъектами местной экономики (особенно это касается фирм, в которых занято большее количество людей), и такая ситуация, скорее всего, сохранится и в следующие 4–5 лет.

Создавая рабочие места и увеличивая инвестиции в производство, индустриальные парки развивают экономику не только региона, но и страны.

После тщательного рассмотрения статистических данных можно подтвердить общее увеличение концентрации занятости в секторе транспортировки и хранения как для Российской Федерации, так и по субъектам Приволжского федерального округа (см. табл. 1). Исключением являются Удмуртская Республика и Пермский край, где в 2023 году по сравнению с 2022 годом произошло снижение доли занятых в этом секторе.

ВРП по-прежнему остается основным индикатором уровня регионального социально-экономического развития. Динамика общего

ВРП России и ПФО представлена в табл. 2 и показывает его рост за 2020–2023 годы. Общий объем ВРП Российской Федерации в номинальном выражении увеличился за анализируемый период на 76630,8 млрд руб. В суммарном выражении по всем субъектам РФ за анализируемый период ВРП увеличился в 1,8 раза. По субъектам РФ в ПФО – в 1,5 раза.

Стабильность экономического развития обеспечивает положительная динамика ВРП в секторе «Транспортировка и хранение» (ТХ): рост в Российской Федерации в 1,7 раза и в ПФО в 1,6 раза за 2017–2023 годы.

Еще одним важным фактором экономического роста региона является инвестиционный капитал, который проанализирован на примере Российской Федерации и ПФО (см. табл. 3). Положительная динамика роста свидетельствует о том, что РФ и ПФО движутся по пути экономического роста за счет увеличения своего капитала, который в последнее время активно распределяется и инвестируется в сектор «Транспортировка и хранение».

Высокая инвестиционная активность в ПФО обусловлена не только локализацией в данном округе крупных предприятий обрабатывающей и добывающей промышленности, но и активным развитием малого и среднего бизнеса, со стороны которых генерируется существенный спрос на площадки индустриальных парков.

Таким образом, за последние четыре года продемонстрированы положительные

Таблица 3

Динамика инвестиций в основной капитал и сектор «Транспортировка и хранение»

	Инвестиции, млрд руб.									
	2021		2022		2023		Абсолютное изменение 2023/2021		Относительное изменение 2023/2021	
	всего	ТХ	всего	ТХ	всего	ТХ	всего	ТХ	всего	ТХ
Российская Федерация	17 690	3226,4	21 829	4219,8	34 036	4963,7	16 346	1737,3	192,40 %	153,85 %
Приволжский Федеральный округ	2073,3	314,2	2 565,2	601,4	4830,2	778,92	2 757	464,72	232,97 %	247,90 %
Кировская область	52,1	6,9	59,2	8,6	106,24	10,4	54	3,5	203,92 %	150,72 %
Нижегородская область	265,6	33,7	462,1	164,5	686,93	226,7	421	193	258,63 %	672,70 %
Оренбургская область	149,3	15,3	179,5	24,9	293,4	32,5	144	17,2	196,52 %	212,42 %
Пензенская область	53,8	9,1	60,3	12,7	121,81	13,6	68	4,5	226,41 %	149,45 %
Пермский край	242,2	21,8	290,2	33,02	370,3	49,5	128	27,7	152,89 %	227,06 %
Республика Башкортостан	247,9	45,6	305,6	53,25	620	58,575	372	12,975	250,10 %	128,45 %
Республика Марий Эл	22,2	2,9	25,5	3,3	52,23	3,63	30	0,73	235,27 %	125,17 %
Республика Мордовия	41,1	6,6	48,6	12,7	74,1	13,97	33	7,37	180,29 %	211,67 %
Республика Татарстан	451,2	59,4	597,5	143,9	1180,4	158,29	729	98,89	261,61 %	266,48 %
Самарская область	264,8	66,6	306,6	97,8	516,6	107,58	252	40,98	195,09 %	161,53 %
Саратовская область	123,1	27,5	149,9	42,5	286,54	46,75	163	19,25	232,77 %	170,00 %
Удмуртская Республика	70,3	5,9	85,96	8,3	166,3	9,13	96	3,23	236,56 %	154,75 %
Ульяновская область	50,2	7,6	56,7	7,7	120,8	8,47	71	0,87	240,64 %	111,45 %
Чувашская Республика	39,5	5,2	71,6	36,2	123,4	39,82	84	34,62	312,41 %	765,77 %

Источник: Федеральная служба государственной статистики <https://rosstat.gov.ru/>

темпы всей региональной экономической деятельности, которая прямо или косвенно связана с сектором транспортировки и хранения. Развитие и увеличение ИП и их различных модификаций (технопарки, бизнес-инкубаторы, ОЭЗ и т.д.) создают инфраструктуру для промышленного производства, особенно в ПФО, в котором сконцентрирована треть действующих ИП страны.

Для изучения степени связи между переменными чаще всего в экономических исследованиях используется корреляционный анализ, который, является инструментом позволяющим показать близость одной переменной к другой. Наиболее часто в подобных исследованиях используется линейный корреляционный анализ [17–19].

Для ПФО для оценки влияния развития ИП на его экономический рост (ВРП, объем инвестиций, численность занятых) рассчитан коэффициент корреляции (детальный расчет в данной статье не приводится), который указывает на тесную взаимосвязь между числом ИП и основными социально-экономическими показателями региона.

В ПФО регионами-лидерами по количеству ИП являются Республики Башкортостан и Татарстан, Ульяновская область (десять и более ИП в регионе). Такое распределение обусловлено уровнем социально-экономической активности, развитой транспортно-логистической инфраструктурой, наличием крупных промышленных объектов, спросом производителей.





ВЫВОДЫ

Проведенный обзорный анализ свидетельствует о том, что ИП играют существенную роль для обеспечения динамичного роста региональных экономик, создания конкурентных условий для новых производств, привлечения отечественных и иностранных инвестиций в регионы, снижения безработицы за счет создания новых рабочих мест, используя трудовой потенциал ближайших населенных пунктов.

Исследование позволяет позитивно определить вклад ИП в достижение целей устойчивого развития регионов за счет создания необходимой инфраструктуры, увеличения занятости, объемов промышленного производства, а также пополнения регионального и местного бюджетов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Lyapin, S., Rizaeva, Y., Kadasev, D., Sysoev, A. Methods to Analyze Traffic Demand formation in Intelligent Transportation and Logistic Regional Network. *Transportation Research Procedia*, 2020, Vol. 45, pp. 522–529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.061>.
2. Boile, M., Theofanis, S., Ozbay, K. Feasibility of freight villages in the NYMTC region. Rutgers University. Center for Advanced Infrastructure and Transportation, 2011. [Электронный ресурс]: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/23252>. Доступ 10.09.2024.
3. Banister, D., Berechman, Y. Transport investments and promotion of economic growth. *Journal of Transport Geography*, 2001, Vol. 9, Iss. 3, pp. 209–218. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00013-8).
4. Notteboom, T., Rodrigue, J.-P. Inland Terminals within North American and European Supply Chains. *Transport and Communication Bulletin for the Asia-Pacific Region*, 2009, No. 78, pp. 1–39. [Электронный ресурс]: <https://core.ac.uk/download/pdf/327177365.pdf#page=12>. Доступ 10.09.2024.
5. Sheffi, Y. Logistics-Intensive Clusters: Global Competitiveness and Regional Growth. In: Bookbinder, J. (eds) *Handbook of Global Logistics*. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 181. Springer, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6132-7_19 [доступ для подписчиков].
6. Rivera, L., Sheffi, Y., Knoppen, D. Logistics clusters: The impact of further agglomeration, training and firm size on collaboration and value-added services. *International Journal of Production Economics*, 2016, Vol. 179, pp. 285–294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.018>.
7. Gafurov, I., Panasyuk, M., Pudovik, E. Interregional Logistic Center as the Growth Point of Regional Economics. *Procedia Economics and Finance*, 2014, Vol. 15, pp. 474–480. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00486-9](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00486-9).
8. Hein, A. M., Jankovic, M., Farel, R., Yannou, B. A Conceptual Framework for Eco-Industrial Parks. *Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Vol. 4: 20th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 9th International Conference on Micro- and Nanosystems. Boston, Massachusetts, USA. August 2–5, 2015. V004T05A024. ASME. DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2015-463229> [доступ для подписчиков].
9. Kiselakova, D., Kiselak, A. Analysis of Macroeconomic Factors for the Establishment of Industrial Parks and Their Effects on Regional Development: Empirical Study from Slovakia. *Asian Economic and Financial Review*, 2014, Vol. 4 (9), pp. 1220–1236. [Электронный ресурс]: <https://archive.aessweb.com/index.php/5002/article/view/1251/1784>. Доступ 10.09.2024.
10. Saleman, Y., Jordan, L. The Implementation of Industrial Parks: Some Lessons Learned in India. *Journal of International Commerce, Economics and Policy*, 2015, Vol. 06, No. 01, 1550005. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793993315500052>.
11. Falahatdoost, S., Wang, X. Industrial Park Role as a Catalyst for Regional Development: Zooming on Middle East Countries. *Land*, 2022, Vol. 11 (8), 1357. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11081357>.
12. Monga, C. Cluster-Based Industrial Parks: A Practical Framework for Action. December 1, 2011. World Bank Policy Research Working Paper No. 5900. [Электронный ресурс]: <https://ssrn.com/abstract=1969272>. Доступ 10.09.2024.
13. Zheng, Siqi; Sun, Weizeng; Wu, Jianfeng; Kahn, M. E. The birth of edge cities in China: Measuring the effects of industrial parks policy. *Journal of Urban Economics*, 2017, Vol. 100, pp. 80–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jue.2017.05.002>.
14. Kozma, G., Molnár, E. The role of industrial parks in the economic development of Debrecen. *TerGazdasag Amber*, 2018, 6 (4), pp. 35–49. [Электронный ресурс]: <http://real.mtak.hu/id/eprint/100048>. Доступ 10.09.2024.
15. Lee, Y.-H., Kao, L.-L., Liu, W.-H., Pai, J.-T. A Study on the Economic Resilience of Industrial Parks. *Sustainability*, 2023, 15 (3), 2462. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032462>.
16. Borodavkina, N., Mukovnina, E. The role of industrial parks in ensuring sustainable development of the region. *E3S Web Conf.*, 291 (2021) 01004. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129101004>.
17. Tian, X., Zhang, M. Research on Spatial Correlations and Influencing Factors of Logistics Industry Development Level. *Sustainability*, 2019, 11 (5), 1356. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11051356>.
18. Lan, S., Yang, C., Huang, G. K. Data analysis for metropolitan economic and logistics development. *Advanced engineering informatics*, 2017, Vol. 32, pp. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.01.003>.
19. Altman, M. A more scientific approach to applied economics: Reconstructing statistical, analytical significance, and correlation analysis. *Economic Analysis and Policy*, 2020, Vol. 66, pp. 315–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.05.006>.
20. Islomov, S., Mamayeva, L. Using of expert assessment method in the management of vehicle enterprises. *AIP Conf. Proc.* 11 March 2024; 3045 (1): 030092. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0197329>. ●

Информация об авторах:

Хайтбаев Валерий Абдурахманович – доктор экономических наук, профессор кафедры «Экономика и менеджмент» Приволжского государственного университета путей сообщения, Самара, Россия, vhaitbaev21@mail.ru.

Черняев Евгений Васильевич – кандидат экономических наук, докторант Вольского военного института материального обеспечения, Вольск, Россия; ki-la@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 05.05.2024, одобрена после рецензирования 12.09.2024, принята к публикации 16.09.2024.



Анализ методических подходов к выбору муниципальных маршрутов регулярных перевозок для эксплуатации электробусов



Максим КУДРЯШОВ



Максим СКОРКИН

Максим Александрович Кудряшов¹,
Максим Валерьевич Скоркин²

^{1, 2} Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет
(МАДИ), Москва, Россия.

¹ РИНЦ SPIN-код: 6666-0154;

РИНЦ Author ID: 890537.

✉ ¹ sparky5@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

Статья посвящена анализу тенденций эксплуатации и выбору параметров для решения задачи оптимального назначения электробусов на заданный набор маршрутов.

Выполнена оценка количества постановок на учет и продаж как одного из методов оценки тенденций эксплуатации электробусов. Определены средние показатели значения емкости АКБ в зависимости от категории и назначения электробуса. Приведены основные статистические значения, полученные по результатам анализа иностранных государственных программ электрификации пассажирского транспорта. Рассмотрен отечественный опыт эксплуатации электробусов на муниципальных маршрутах регулярных перевозок.

По результатам выполненного анализа, с учетом выявленных тенденций поставлена задача выбора первоочередных параметров для определения обслуживаемых электробусами маршрутов.

Ключевые слова: пассажирский транспорт, электробус, муниципальные маршруты регулярных перевозок, технико-эксплуатационные показатели маршрута.

В качестве объекта исследования выбраны муниципальные маршруты регулярных перевозок, обслуживаемые ГУП «Мосгортранс», крупнейшим в Европе оператором, эксплуатирующим электробусы.

В качестве основного метода исследования использована апробированная методика мета-анализа ранее выполненных исследований PRISMA. По результатам выполненного анализа двадцати двух методических подходов к организации работы электробусов определены четыре первоочередных технико-эксплуатационных параметра, влияющих на выбор маршрута (L_m , V_z , $N_{ост}$, Q). Предложен общий алгоритм решения задачи по выбору оптимальных муниципальных маршрутов регулярных перевозок для эксплуатации электробусов. Определены направления дальнейших исследований.

Для цитирования: Кудряшов М. А., Скоркин М. В. Анализ методических подходов к выбору муниципальных маршрутов регулярных перевозок для эксплуатации электробусов // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-8>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы интенсивно реализуется тенденция к росту использования электробусов на муниципальных маршрутах регулярных перевозок. Актуальным в этой связи является решение задачи оптимального назначения электробусов на заданный набор маршрутов. Целью представленного в статье исследования является анализ тенденций эксплуатации и выбора параметров для решения этой задачи.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ общемировых тенденций эксплуатации электробусов на муниципальных маршрутах регулярных перевозок

Одним из методов оценки тенденций эксплуатации электробусов является оценка количества постановок на учет и продаж. Постановки на учет показывают количество автомобилей, которые впервые были поставлены на учет в государственных органах или страховых компаниях.

На рис. 1 представлены результаты анализа количества постановок на учет и процент продаж электробусов в мире в 2016–2022 годах. Необходимо отметить, что в Китае страхование транспортного средства производится в отношении машины, а не конкретного водителя.

В соответствии с докладом Международного энергетического агентства (МЭА), «в 2022 году во всем мире было продано около 66 тысяч электробусов, что составляет около 4,5 % всех продаж автобусов. Китай продолжает лидировать в производстве и продажах электрических автобусов. В 2022 году в КНР было зарегистрировано 54 тыс. новых электробусов, что составляет 18 % от общего объема продаж автобусов в Китае и около 80 % от общемирового объема продаж электробусов». Важно отметить, что «многие автобусы, продаваемые в Европе, Латинской и Северной Америке, были так же сделаны китайскими производителями»¹.

«В Европе наибольший процент продаж электробусов был зафиксирован в Финляндии, где на электробусы приходилось 2/3 продаж автобусов в 2022 году; в Норвегии и Нидер-

ландах на них приходилась почти половина продаж; а в Дании – почти треть. Также процент продаж был высоким в Швеции, Швейцарии и Израиле»¹.

Важно заметить, что несколько лет объемы производства и продаж электробусов колебались за счет предоставляемых субсидий (общая сумма субсидий с 2018 по 2021 год составила менее 2,9 млрд долл. США), однако, начиная с 2021 года, продажи электробусов начали снова расти¹.

Из имеющихся в продаже моделей электробусов в 2022 году 60 % (более 500 моделей) были произведены китайскими производителями. Еще 20 % (более 170 моделей) были произведены американскими производителями и 15 % (более 120 моделей) – европейскими¹.

Таблица, составленная на основе данных¹ и Global Drive to Zero ZETI², представляет модельный ряд автобусов с нулевым уровнем выбросов и среднюю емкость используемых на них аккумуляторов (табл. 1).

С 2021 по 2022 год увеличился спрос на литий-ионные аккумуляторные батареи примерно на 65 % с ~330 ГВт ч до ~550 ГВт ч, главной причиной стал рост продаж электрических легковых автомобилей, при этом количество новых постановок на учет увеличилось на 55 % в 2022 году относительно 2021 года¹.

В 2022 году, согласно указанному докладу МЭА, отмечен «рост венчурного финансирования производства электромобилей и технологий зарядки (на 50 % до 1,2 млрд долларов США, 2021–2022 гг.). Особенно значительный рост произошел в сегменте зарядки, который получил рекордное финансирование в размере 730 миллионов долларов США. Финансирование переработки и повторного использования аккумуляторов также заметно увеличилось и составило 200 миллионов долларов США, что в восемь раз больше, чем в 2021 году»¹. Аналогичные тренды выявлены и в данных Cleantech Group i3³.

На основе базы данных МЭА⁴, авторами были отобраны для анализа 294 документа стратегического планирования и программы

¹ Global EV Outlook 2023 (Глобальный прогноз развития электромобилей, 2023 год). Доклад Международного энергетического агентства [Электронный ресурс]: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Доступ 04.12.2023.

² ZETI (Zero-Emission Technology Inventory). [Электронный ресурс]: <https://globaldrivetozero.org/tools/zeti/>. Доступ 04.12.2023.

³ Веб-сайт Cleantech Group i3 [Электронный ресурс]: <https://www.cleantechforeurope.com/publications/cleantech-q3-briefing-2022#chapter-03>. Доступ 04.05.2023.

⁴ IEA policies database [Электронный ресурс]: <https://www.iea.org/policies/sector%5B0%5D=Passenger%20transport%20%28Road%29>. Доступ 04.05.2023.

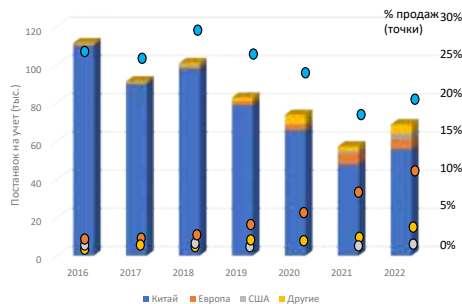


Рис. 1. Количество постановок на учет и процент продаж электробусов в мире в 2016–2022 гг [IEA (2023), *Electric bus registrations and sales share by region, 2015–2022*, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-bus-registrations-and-sales-share-by-region-2015–2022>, Licence: CC BY 4.0].

Таблица 1
Средняя емкость АКБ электробусов ^[1, Global Drive to Zero ZETI database]

Категория и назначение ТС	Средняя емкость АКБ (кВт·ч)				Изменение среднего показателя 2019–2022 гг.
	2019	2020	2021	2022	
МЗШ, муниципальные и региональные перевозки	264	322	225	345	31 %
МЗІ, МЗІІ, заказные перевозки	104	119	120	150	45 %
МЗІ, МЗІІ, перевозки организованных групп детей	155	141	207	137	–12 %



Рис. 2. Количество документов и программ различных стран в сфере электрификации наземного городского пассажирского транспорта [на основе данных ¹].

(включая планы, документы, устанавливающие преференциальные режимы, гранты и т. д.), имеющих отношение к электрификации наземного городского пассажирского транспорта (НГПТ), среди которых наибольшее количество было утверждено в Испании, Португалии, США, КНР, Италии и Канаде (рис. 2).

Из 294 программных документов 223 (76 %) являлись на тот момент действующими, 66 (23 %) утратили силу, оставшиеся находились на стадии утверждения и разработки (рис. 3).

Анализ сферы действия документов (рис. 4) показывает преобладание программ национальной юрисдикции (239 или 81,3 %

от общего числа), за ними следует городская/муниципальная юрисдикция (30 или 10,2 %), юрисдикция штата/провинции (22 или 7,5 %) и международная юрисдикция (3 или 1 %).

В значительном числе анализируемых программ приводятся прогноз запаса хода и мощности электробусов на период до 2030 гг. по различным сценариям, а также прогнозные значения по количеству зарядных станций.

Отечественный опыт эксплуатации электробусов

По состоянию на 2023 год в Российской Федерации основными производителями электробусов являлись: ПАО «КАМАЗ», ПАО



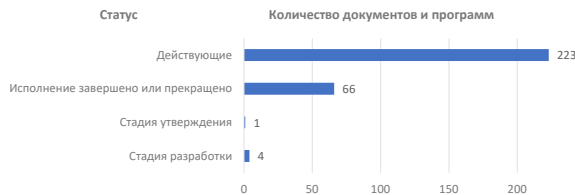


Рис. 3. Распределение документов и программ по статусу [на основе данных *].



Рис. 4. Распределение документов и программ по юрисдикциям [на основе данных *].

Таблица 2
Модельный ряд производителей
электробусов [составлено авторами]

№	Производитель	Количество моделей
1	ПАО «КАМАЗ»	2
2	ПАО «ГАЗ»	1
3	ООО «Волгабас»	1
4	АО «Синара-Транспортные Машины»	1
5	ООО «ПК Транспортные системы»	3
6	АО «Стройтранс»	1

Таблица 3
Эксплуатация электробусов
на муниципальных маршрутах регулярных
перевозок [составлено авторами]

Город	Количество электробусов	Количество маршрутов
Москва	1055	79
Санкт-Петербург	10	1
Липецк	5	1
Владивосток	2	1
Рыбинск	2	1
Сочи	2	1
Тюмень	1	1

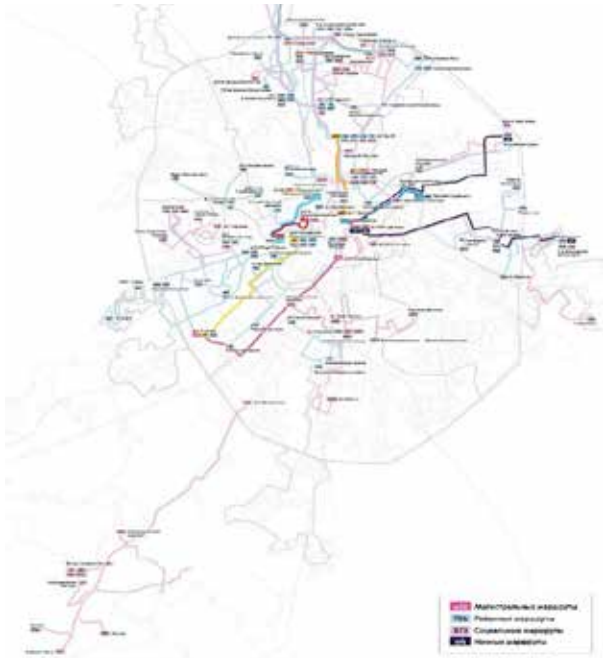


Рис. 5. Схема маршрутной сети электробусов (Схема маршрутов электробуса. [Электронный ресурс]: <https://www.mosgortrans.ru/electrobus/map/>. Доступ 07.05.2023.)

«ГАЗ», ООО «Волгабас», АО «Синара-Транспортные машины», ООО «ПК транспортные системы», АО «Стройтранс». Модельный ряд, представленный на официальных сайтах производителей, систематизирован в табл. 2.

По состоянию на январь 2023 года электробусы обслуживали муниципальные маршруты регулярных перевозок в семи городах (табл. 3).

Таким образом, крупнейшим оператором НГПТ, эксплуатирующим электробусы на регулярных муниципальных маршрутах, является ГУП «Мосгортранс». По состоянию на март 2023 года ГУП «Мосгортранс» эксплуатировало 1055 электробусов на 79 маршрутах. Трассы следования маршрутов электробуса представлены на рис. 5.

Анализ информации о зарядной инфраструктуре электробусов (количестве и местоположении зарядных станций) был выполнен по результатам заключенных контрактов, опубликованных на веб-сайте государственных закупок. На основе анализа было выявлено, что на конец 2022 года в Москве расположено 208 зарядных станций, часть которых представлена на рис. 6. Местоположение 82 зарядных станций в ТЗ отсутствовало (использовалась формулировка: «точный адрес поставки предоставляется Поставщику путем официального уведомления от ГУП «Мосгортранс» в течение 5 (пяти) рабочих дней с момента подписания договора»).

Анализ методических подходов по назначению электробусов на маршрут

В целях определения факторов, влияющих на выбор перевода маршрута или создание нового маршрута для электробуса, был проведен анализ методических подходов к эксплуатации электробусов на муниципальных маршрутах с применением апробированной ранее методологии PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [1]. Общий алгоритм методологии представлен на рис. 7.

Формирование перечня поисковых запросов было выполнено с использованием программных продуктов для составления семантического ядра и анализа ключевых слов в ранее выполненных исследованиях.

При последующей оценке частотности и кластеризации с учетом их семантики до-

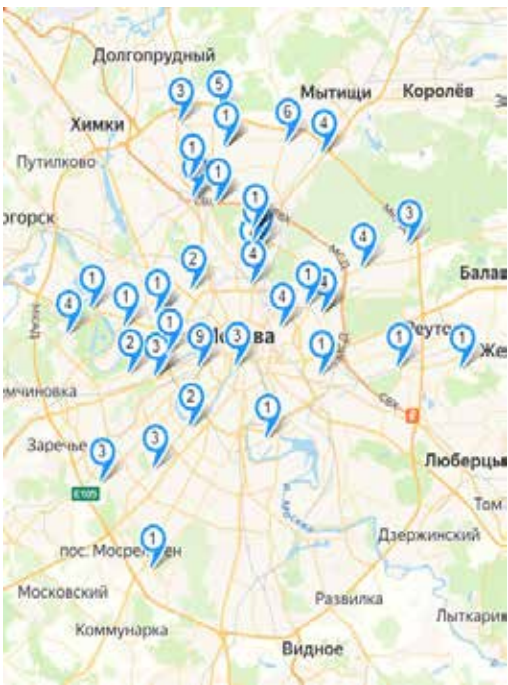


Рис. 6. Расположение части зарядных станций ГУП «Мосгортранс» [рисунок составлен авторами].

полнительно был выполнен анализ ключевых слов в ранее выполненных исследованиях.

Выполненный анализ показывает, что особую актуальность данное направление получило в последние годы. Также необходимо отметить, что большинство работ выполнено иностранными авторами.

Анализ показал, что основными показателями при выборе маршрута для обслуживания электробусами являются: пассажиропоток, скорость, количество остановочных пунктов и длина маршрута. Время оборота на маршруте исключено из дальнейшего анализа, поскольку данный параметр является напрямую зависимым от учитываемой длины маршруты, скорости, количества остановочных пунктов. В таблице 4 представлены сводные результаты качественного анализа включенных в него публикаций.

Обоснование выбора автобусного маршрута для перевода его на электробусы

При разработке проектов эксплуатации автобусов на электрической тяге на муниципальных маршрутах регулярных перевозок необходимо определить качественные и количественные требования к зарядной инфра-



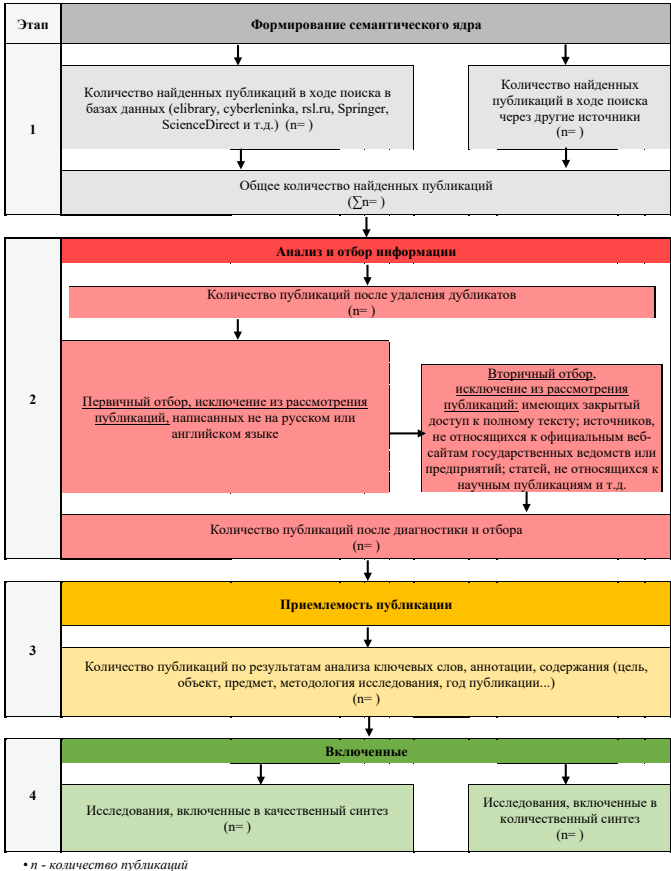


Рис. 7. Адаптированная схема методологии PRISMA [составлена авторами].

структуре и подвижному составу, выполнить экономическую оценку предлагаемых решений в конкретных условиях эксплуатации.

Общий алгоритм решения задачи по выбору оптимальных муниципальных маршрутов регулярных перевозок для эксплуатации электробусов с учетом отобранных параметров изображен на рис. 8.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Направлением дальнейших исследований является статистический и кластерный анализ автобусных, электробусных и всей совокупности маршрутов ГУП «Мосгортранс» по выбранным параметрам с оценкой доли электробусных маршрутов в кластерах. Дополнительно предлагается выполнить оценку соот-

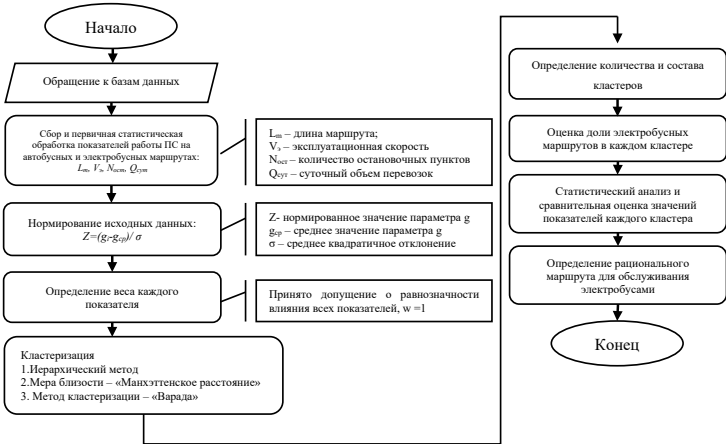


Рис. 8. Алгоритм решения задачи по выбору оптимальных муниципальных маршрутов регулярных перевозок для эксплуатации электробусов [выполнено авторами].

Таблица 4

Учет показателей влияющих на выбор маршрута [составлено авторами]

№ п/п	Технико-экономические показатели (ТЭП)												Источник
	Маршрут							Пассажиропоток					
	V _э	I	L _м	t _{об}	h _э	N _{ост}	l _ж	Q _{max}	Q _ч	Q _{сут}	Π _і	P _ч	
1	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	[2]
2	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	[3]
3	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	[4]
4	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	[5]
5	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	[6]
6	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	[7]
7	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	*
8	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	[8]
9	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	[9]
10	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	[10]
11	-	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	[11]
12	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	[12]
13	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	[13]
14	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	[14]
15	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	[15]
16	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	**
17	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	[16]
18	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	***
19	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	[17]
20	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	[18]
21	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[19]
Σ	13	4	21	17	8	14	13	6	8	11	3	4	

Примечания: $V_{\text{э}}$ – эксплуатационная скорость; I – интервал движения; $L_{\text{м}}$ – протяженность маршрута; $t_{\text{об}}$ – время оборота подвижного состава; $h_{\text{э}}$ – частота движения; $N_{\text{ост}}$ – общее количество остановочных пунктов; l_j – протяженность j-го участка маршрута; Q_{max} – максимальный пассажиропоток; $Q_{\text{ч}}$ – часовой пассажиропоток; $Q_{\text{сут}}$ – суточный пассажиропоток; P_i – пассажирообмен i-го остановочного пункта; $P_{\text{ч}}$ – пассажиропоток по участкам маршрута.

* Доклад Международного союза общественного транспорта. Performance evaluation framework: For electric buses in India. [Электронный ресурс]: <https://www.uitp.org/publications/performance-evaluation-framework-for-electric-buses-in-india/>. Доступ 05.05.2023.

** The Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH [Немецкое агентство по международному сотрудничеству]. Training Needs Assessment for Electric Buses in India: Volume I–Identification of Training Needs. [Электронный ресурс]: <https://transformative-mobility.org/multimedia/training-needs-assessment-for-electric-buses-in-india-volume-i-identification-of-training-needs/>. Доступ 05.05.2023.

*** E-Bus. Solution booklet. Smart Cities Marketplace 2023 European Union. [Электронный ресурс]: <https://www.eiturbanmobility.eu/wp-content/uploads/2023/02/230113-Solution-Booklet-E-bus-Updated.pdf>. Доступ 07.05.2023.

ветствия автобусных и электробусных маршрутов путем сопоставления средних значений нормированных показателей всей совокупности полученных кластеров электробусных и автобусных маршрутов. По результатам анализа выдвигается гипотеза о наибольшем соответствии кластера автобусных маршрутов электробусным. Для апробации предложенной методики и решения технологических задач организации работы подвижного состава, с учетом однородности параметров

маршрутов в кластере, выбирается маршрут и решаются основные технологические задачи организации работы электробуса на выбранном маршруте:

- определение номинальной пассажироместимости в соответствии с требованиями социального стандарта транспортного обслуживания населения в редакции распоряжения Минтранса России от 13.04.2018 № НА-55-р;

- планирование работы подвижного состава и водителей, в том числе графика дви-





жения и расхода электроэнергии, на маршруте.

В завершение необходимо выполнить расчет основных технико-эксплуатационных и экономических показателей, составить точную ведомость технико-экономических показателей и смету текущих затрат при обычной системе налогообложения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кудряшов М. А., Блудян Н. О. Методы оценки температурных режимов в салоне транспортных средств общественного городского транспорта // *Транспорт: наука, техника, управление*. – 2022. – № 2. – С. 43–54. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-02-7.
2. Горбунова А. Д. Анализ факторов, влияющих на выбор городского регулярного маршрута для ввода электробуса // *Вестник гражданских инженеров*. – 2021. – № 4 (87). – С. 127–133. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-4-127-133.
3. Горбунова А. Д. Влияние маршрутной нормы расхода электроэнергии электробусом на выбор городского регулярного маршрута для его эксплуатации // *Перспективное развитие науки, техники и технологий: сб. научных статей 11-й Международной научно-практ. конференции, Курск, 29 октября 2021 года*. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 82–84. EDN: UFUNGO.
4. Горбунова А. Д., Смирнова О. Ю. Разработка алгоритма выбора рационального регулярного городского маршрута для эксплуатации электробуса // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. – 2021. – Т. 18. – № 4 (80). – С. 378–389. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389.
5. Jain, M., Jain, H., Tiwari, G., Rao, K. R. Indicators to Measure Performance Efficiency of Bus Systems. Final Report. Prepared for Shakti Sustainable Energy Foundation, New Delhi. TRIPP-PR-16-02. Transportation Research and Injury Prevention Programme, Indian Institute of Technology. Delhi, 2026, 56 p. [Электронный ресурс]: <https://shaktifoundation.in/wp-content/uploads/2016/07/Indicators-to-measure-performance-efficiency-of-bus-systems1.pdf>. Доступ 28.02.2024.
6. Hjelkrem, O. A., Lervåg, K. Y., Babri, S., Lu Chaoru., Södersten, C. J. A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, Vol. 94, 102804. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102804.
7. Кудряшов М. А., Прокопенков А. В., Айриев П. С. Методический подход к организации перевозок на электробусных маршрутах // *Мир транспорта*. – 2020. – Т. 18. – № 5 (90). – С. 152–170. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-152-170.
8. Rebouças, A. B., Daniel, J., Delgado, O. Operational analysis of battery electric buses in São Paulo. Technical study developed for São Paulo Transportes S/A (SPTTrans) as part of the ZEBRA initiative (Zero Emission Bus Rapiddeployment Accelerator) [Электронный ресурс]: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/Operational-analysis-of-battery-electric-buses-in-Sao-Paulo-final2-feb2023.pdf>. Доступ 05.12.2023.
9. Eudy, L., Prohaska, R., Kelly, K. J., Pos Foothill Transit Battery Electric Bus Demonstration Results. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2016, Report number: NREL/TP-5400-65274. DOI: 10.13140/RG.2.1.1236.0087.
10. Su, X., Jiang, L., Huang, Y. Design of Electric Bus Transit Routes with Charging Stations under Demand Uncertainty. *Energies*, 2023, Vol. 16, Iss. 4, 1848. DOI: 10.3390/en16041848.
11. Thorne, R. J., Hovim, I. B., Figenbaum, E., Pinchasik, D. R., Amundsen, A. H., Hagman, R. Facilitating adoption of electric buses through policy: Learnings from a trial in Norway. *Energy Policy*, 2021, Vol. 155, 112310. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112310.
12. Göhlich, D., Kunith, A., Ly, Tu-Anh. Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin. *WIT Transactions on The Built Environment*, 2014, Vol. 138, pp. 137–149. DOI: 10.2495/UT140121.
13. Wang, Y., Liao, F., Lu, C. Integrated optimization of charger deployment and fleet scheduling for battery electric buses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, Vol. 109 (12), 103382. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103382.
14. Xylia, M., Leduc, S., Patrizio, P., Kraxner, F., Silveira, S. Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, Vol. 78, pp. 183–200. DOI: 10.1016/j.trc.2017.03.005.
15. Gong, J., He, J., Cheng, C., King, M., Yan, X., He, Z., & Zhang, H. Road Test-Based Electric Bus Selection: A Case Study of the Nanjing Bus Company. *Energies*, 2020, Vol. 13, Iss. 5, 1253. DOI: 10.3390/en13051253.
16. Кудряшов М. А., Прокопенков А. В., Айриев П. С. К вопросу нормативного обеспечения эксплуатации пассажирских электрических транспортных средств // *Мир транспорта*. – 2020. – Т. 18. – № 1 (86). – С. 196–211. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-196-211.
17. Капский Д. В., Кузьменко В. Н., Красильникова А. С., Семченков С. С., Кот Е. Н., Ларин О. Н. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке // *Наука и техника*. – 2022. – Т. 21. – № 2. – С. 150–157. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157.
18. Lotfi, M., Pereira, P., Paterakis, N., Gabbar, H. A., Catalão, J. P. S. Optimizing Charging Infrastructures of Electric Bus Routes to Minimize Total Ownership Cost. 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Madrid, Spain, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160687.
19. Кайрмухамбетов О. Б. Характеристики производительности электрических автобусов // *Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева*. – 2021. – № 1 (116). – С. 136–144. DOI: 10.52167/1609-1817-2021-116-1-136-144. ●

Информация об авторах:

Кудряшов Максим Александрович – старший преподаватель базовой кафедры «Городской пассажирский транспорт» на базе ГУП «Мосгортранс», Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, sparky5@yandex.ru.

Скоркин Максим Валерьевич – бакалавр кафедры автомобильных перевозок, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, xzelution@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 08.12.2023, одобрена после рецензирования 03.09.2024, принята к публикации 10.09.2024



Методическая основа классификации пригородных пассажирских компаний в России



Виктор ПОДСОРИН



Владимир БУРОВЦЕВ



Андрей КОБЫЛИЦКИЙ



Анастасия КУРАНОВА

**Виктор Александрович Подсорин¹, Владимир Викторович Буровцев²,
Андрей Николаевич Кобылицкий³, Анастасия Алексеевна Куранова⁴**

¹Российский университет транспорта, Москва, Россия.

^{2, 3, 4}Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия.

¹ ORCID: 0000-0002-2552-8536; Web of Science Researcher ID: IRZ-6836-2023; Scopus Author ID: 57203539855; РИНЦ SPIN-код: 1168-4110, РИНЦ Author ID: 410922.

² РИНЦ SPIN-код: 6449-9512, РИНЦ Author ID: 787476.

³ ORCID: 0000-0003-2109-0124; Web of Science Researcher ID: ABB-1203-2020; Scopus Author ID: 57215859242; РИНЦ SPIN-код: 9573-4237, РИНЦ Author ID: 614895.

✉ ¹ podsorin@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Для решения экономических проблем пригородного пассажирского комплекса железнодорожного транспорта требуется формирование новых и совершенствование существующих методических основ его функционирования. На данном этапе развития пассажирских перевозок в Российской Федерации их, как правило, принято разделять по видам транспорта и видам сообщений. Железнодорожные пассажирские перевозки по видам сообщений укрупненно разделяют на дальнее следование и пригородное сообщение.

В результате структурной реформы железнодорожного транспорта, которая проведена с 2003 по 2015 годы, сформирован рынок пригородных пассажирских железнодорожных перевозок. Данный рынок представлен 25 пригородными пассажирскими компаниями – дочерними и зависимыми обществами ОАО «РЖД», рядом независимых перевозчиков и структурных подразделений ОАО «РЖД», выполняющих перевозки в специальных условиях. Пригородные пассажирские железнодорожные перевозчики являются субъектами естественных монополий и в большинстве случаев созданы с участием региональных органов власти, а их деятельность является социально значимой для обеспечения транспортной подвижности населения в регионах Российской Федерации. Таким образом, транспортный рынок пригородных пассажирских перевозок является сложной системой с особым порядком взаимодействия ее основных субъектов.

Ключевые слова: пассажирооборот, транспортный рынок, пригородные пассажирские компании, субсидии, финансовые результаты, квартильный анализ, ABC–XYZ-анализ, убыточность, риск.

В современной научной и учебной литературе существует определенный пробел в классификации структурных элементов пассажирского транспортного рынка. Авторами предложено использовать инструмент ABC–XYZ-анализа для формирования так называемого «ядра» пригородных пассажирских компаний и исследования региональных диспропорций транспортной пассажирской системы.

В статье предложены методические основы классификации пригородных пассажирских компаний в зависимости от величины субсидий к выполненному пассажирообороту. На основе исследования соотношения субсидий, предоставляемых пригородному пассажирскому комплексу в результате государственного регулирования тарифов и выполненного пассажирооборота произведена классификация пригородных пассажирских компаний (ППК). В результате проведенного авторами ABC–XYZ-анализа показателей работы ППК разработана их классификация на основе данных рассмотренного периода и предложены рекомендации по оценке рисков убыточности и возможных путей их снижения. Выявленная структура пригородного пассажирского транспортного рынка может служить основой для сглаживания диспропорций в уровне транспортного обслуживания населения.

Для цитирования: Подсорин В. А., Буровцев В. В., Кобылицкий А. Н., Куранова А. А. Методическая основа классификации пригородных пассажирских компаний в России // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-9>.

**Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.**



ВВЕДЕНИЕ

Потребность человека в передвижении удовлетворяется на пассажирском транспортном рынке, где вступают во взаимодействие пользователи транспорта и транспортные организации, оказывающие различные транспортные услуги. Транспортный рынок в сфере пассажирских перевозок (рынок пассажирских перевозок) имеет свои отличительные особенности, такие как условия осуществления перевозок и необходимость государственного регулирования, как в России, так и за рубежом^{1,2} [1–4].

К пользователям транспорта следует относить пассажиров, а к субъектам рынка – компании-перевозчики. Регуляторами транспортного рынка в сфере пассажирских перевозок выступают федеральные и региональные органы исполнительной власти, в сферу ответственности которых отнесено формирование тарифов на услуги естественных монополий и антимонопольное регулирование^{1, 3}.

МЕТОДОЛОГИЯ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Транспортный рынок в сфере пригородных железнодорожных перевозок является сложной социально-экономической системой, которая сформировалась по итогам структурной реформы железнодорожного транспорта Российской Федерации в период с 2001 по 2015 годы. Причем продление сроков проведения реформы на пять лет (2010–2015 год) во многом было обусловлено незавершенностью рыночной трансформации пассажирского комплекса железнодорожного транспорта как в дальнем следовании, так и в пригородном сообщении [7–9]. В указанный период формировалась система нормативных правовых актов, которые регулировали правила и порядок взаимодействия участников рынка в части аренды инфраструктуры, подвижного состава и порядка компенсации выпадающих доходов в результате государственного регулирования тарифов; правительством оказывались объемы необходимой финансовой под-

держки как владельцу инфраструктуры, так и дотационным регионам, создавались пригородные пассажирские компании (ППК). Однако сложившийся рынок пригородных пассажирских перевозок нельзя признать однородным как в части выполняемых объемов транспортной работы, так и в части эксплуатационных, социально-экономических и иных условий. В работах авторов [10; 11] выявлена значительная неравномерность выделяемых дотаций пригородному пассажирскому комплексу как в абсолютном выражении, так и относительных показателях, например, по величине субсидий на выполненный пассажирооборот.

Целью исследования является разработка методических подходов к классификации субъектов пригородного пассажирского комплекса для совершенствования экономического механизма его устойчивого развития.

Методология исследования базируется на работах отечественных и зарубежных авторов в области экономики пассажирского комплекса на железнодорожном транспорте, а также публикациях результатов научных исследований по его развитию. Основными научными методами и приемами являются методы системного подхода, математической статистики, экономического анализа и др.

Методическая основа классификации пригородных пассажирских компаний в России опирается на:

- системный анализ, то есть весь комплекс методологического инструментария, который применяется для выработки и обоснования решений по проблемам сложных систем;
- методику квартильного и ABC–XYZ–анализа;
- методологию индикативного планирования и прогнозирования показателей работы транспортных организаций.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Принципиальная схема дотирования пассажирского железнодорожного комплекса в результате государственного регулирования тарифов следующая. Согласно Методике расчета экономически обоснованных затрат, пригородные пассажирские компании производят оценку ожидаемых затрат по элементам и составляющим: для вагонной, инфраструктурной и вокзальной составляющих затрат в виде расчета индекса изменения объемов работы в вагоно-

¹ Концепция развития пригородных пассажирских перевозок железнодорожным транспортом. – Утв. распоряжением Правительства РФ от 19.05.2014 N 857-р. [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/499097146?marker=656010>. Доступ 18.10.2023.

² Экономика пассажирского транспорта: Учеб. пособие для бакалавров / под ред. В. А. Персианова. – 2-е изд., стер. – М.: Кнорус, 2014. – 390 с.

километрах, а для локомотивной – в поездок-километрах. Результаты оценки предоставляются в органы исполнительной власти субъекта в области государственного регулирования тарифа, в соответствии с ними формируется государственный заказ на транспортное обеспечение [12; 13].

В связи с государственным регулированием тарифа, установленным ниже экономически обоснованного уровня, при выполнении государственного заказа образуются выпадающие доходы, которые впоследствии компенсируются из средств региональных бюджетов в виде государственной помощи субъектам естественных монополий.

На рынке пассажирских перевозок в дальнейшем следовании тоже действует механизм субсидирования за государственное регулирование установленного тарифа, например, в отношении таких операторов, как АО «Федеральная пассажирская компания» (АО «ФПК») и «Дирекция скоростного сообщения» (ДОСС) – филиал ОАО «РЖД», функционирующий в сфере перевозок скорыми, скоростными и высокоскоростными поездами^{3, 4, 5}. Регулирование пассажирских перевозок в дальнейшем следовании производится по другой схеме, а именно через установление тарифа за проезд в плацкартных и общих вагонах в соответствии с тарифом, рассчитанным по приказу ФСТ России от 27.07.2010 № 156-т/1, скорректированным интегрированным индексом для соответствующего периода, а также дифференцированными по календарным периодам года индексами [13].

Субсидии выступают основным источником покрытия убытков ППК, что подтверждается фактом того, что структурно у более чем половины компаний компенсации состав-

ляют 40–65 % доходов^{6, 7} [2]. Экономическим обоснованием необходимого размера субсидии выступает ежеквартальная отчетность о составе затрат ППК^{1, 7} [10; 11].

Для оценки эффективности предоставления субсидий ППК региональными органами власти авторами проведена группировка размера компенсаций на пассажиро-километр при помощи расчета квартилей в ранжированном ряду (см. табл. 1). В качестве основного анализируемого показателя выбрано соотношение величины субсидий пригородным пассажирским компаниям к выполняемому ими пассажирообороту на основе опубликованных данных корпоративной отчетности. Аппроксимированный массив данных за период 2021–22 гг. использовался исключительно для апробации методологии классификации ППК, а не для сравнения показателей эффективности деятельности отдельных компаний, что не входило в задачи авторов, тем более с учетом рассмотрения относительно короткого временного периода. В этой связи дальнейшие расчеты приводятся в статье без указания наименований конкретных ППК.

Для углубленной классификации ППК авторами проведен статистический анализ эффективности получаемых субсидий по методике ABC–XYZ.

ABC-анализ (см., напр.,^{8, 9}, [14–15]) предполагает ранжирование множества ППК в зависимости от величины соотношения субсидии и пассажирооборота перевозчика. Компании объединяются в три группы: группа А – ППК с высокими затратами бюджетных средств на один пассажиро-километр; группа В – умеренный результат использования субсидии; группа С – наиболее эффективное применение выделенной компенсации. Метод распределения ППК по группам предполагает удовлетворение следующим усло-

³ Об определении экономически обоснованного уровня тарифов на перевозки пассажиров железнодорожным транспортом общего пользования в дальнейшем следовании в плацкартных и общих вагонах на 2023 год и его прогнозного уровня на 2024 год. – Приказ ФАС России от 5 мая 2023 г. № 270/23 // Справочно-правовая система «Консультант Плюс» / Компания «Консультант Плюс». [Электронный ресурс]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_448640/. Доступ 27.10.2023.

⁴ Годовой отчет акционерного общества «Федеральная пассажирская компания» за 2022 год // Центр раскрытия корпоративной информации АО «ИА Интерфакс». [Электронный ресурс]: <https://www.e-disclosure.ru/portal/FileLoad.ashx?FileId=1799918>. Доступ 19.10.2023.

⁵ Официальный сайт ОАО «РЖД». [Электронный ресурс]: <https://company.rzd.ru/ru/9349>. Доступ 13.10.2023.

⁶ Годовой отчет акционерного общества «Центральная пригородная пассажирская компания» за 2022 год // Веб-сайт <https://disclosure.skrin.ru/disclosure/7705705370/?DTI=7> [Электронный ресурс]: <https://clck.ru/3PxxTD>. Доступ 15.10.2023.

⁷ Центр раскрытия корпоративной информации АО «ИА Интерфакс». [Электронный ресурс]: <https://www.e-disclosure.ru>. Доступ 12.10.2023.

⁸ Кочнева Д. И. Методы и модели логистики: Учеб.-метод. пособие. – Екатеринбург: УрГУПС, 2018. – 166 с.

⁹ Фалин Г. И., Фалин А. И. Избранные главы описательной статистики: Учеб. пособие. – М.: МАКС Пресс, 2011. – 131 с.



виям: А – 50 % первых сумм долей накопительным итогом; В – от 50 до 80 % и С – более 80 % кумулятивного показателя. Результаты группировки пригородных пассажирских перевозчиков по АВС-анализу приведены в табл. 2.

Следующий этап классификации заключается в проведении XYZ-анализа, с помощью которого происходит ранжирование ППК по динамике показателей, что характеризует стабильность и прогнозируемость изменений.

Оценка производится на основе вычисления коэффициента вариации по каждой компании за расчетный период деятельности. Коэффициент вариации представляет собой отношение среднеквадратического отклонения к среднеарифметической, отражая степень разброса значений вокруг средней величины.

Так, дисперсия (σ^2) и среднеквадратическое отклонение σ рассчитываются по формулам (1) и (2) ^{9, 11, 12}:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (1)$$

где \bar{x} – среднее значение субсидии на пассажирооборот за рассматриваемый период, руб./пасс.-км;

x_i – значение субсидии на пассажирооборот за i -й год, руб./пасс.-км; n – число лет, за которое проводится анализ,

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}. \quad (2)$$

Следовательно, коэффициент вариации (v) может быть определен по следующим формулам ^{9, 11, 12}:

$$v = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}} \cdot 100\% \text{ или } v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

На основе полученного коэффициента вариации пригородный пассажирский перевозчик относится к одной из трех групп: Х – при коэффициенте вариации от 0 % до 10 %, что указывает на стабильность и точность прогнозирова-

ния рассматриваемого показателя; Y – от 10 % до 25 %, что отражает умеренную однородность совокупности и вероятность отклонения прогноза от фактического положения на величину не более чем 25 %; Z – что указывает на высокую изменчивость показателя рассматриваемой ППК ^{8,9,11}. Итоги группировки указаны в табл. 3.

По результатам интеграции АВС-анализа и XYZ-анализа, составлена сводная табл. 4

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ АВС–XYZ показал, что структурно наибольший удельный вес принадлежит группе СХ – 30,43 % (см. табл. 4). Большую часть ППК, относящихся к группе СХ, отличают достаточно высокие бюджетные поступления субсидий. Относительно объемов транспортной работы данные компании стабильно показывают высокую эффективность вложений бюджетных средств – средний уровень субсидии на пассажирооборот по группе составляет 1,47 руб./пасс.-км, учитывая низкую вариацию.

Перевозчики группы СУ отличаются меньшей степенью стабильности, однако, так же, как и представители группы СХ, результаты их работы оправдывают объемы финансового обеспечения.

Пригородные перевозчики групп ВХ и ВУ напротив менее эффективны с точки зрения использования компенсаций и, в сравнении с квартильной классификацией, полностью числятся в составе «центральной» группы. ППК, входящие в ВХ, имеют стабильный результат, однако, учитывая их среднюю эффективность, данным перевозчикам целесообразно перейти в группу с более динамичным показателем работы.

Наибольшего внимания требуют группы АХ и АУ, так как содержащиеся в них компании имеют наиболее высокие затраты на единицу пассажирооборота. Более того, из анализа АВС–XYZ видно, что компании 2 и 3 устойчиво занимают указанные в квартильной классификации позиции (третья группа).

ППК 21 (группа СZ) показала наибольшую эффективность используемых средств в 2022 году. Наивысший показатель вариации – 39,24 % (см. табл. 3), при его положительном тренде, указывает на целесообразность полученных компенсаций и соответствие их получения показателям пассажирооборота. Прогнозируя дальнейшую деятельность ППК 21, можно отметить две основные перспективы: укрепление пози-

¹⁰ Пассажирооборот железнодорожного транспорта общего пользования // Федеральная служба государственной статистики Российской Федерации (Росстат): официальный сайт. [Электронный ресурс]: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport>. Доступ 15.10.2023.

¹¹ Доугерти К. Введение в эконометрику. Учебник для вузов: Пер. с англ. - М.: Инфра-М, Экон. фак. МГУ им. М.В. Ломоносова, 1999. - XIV, 402 с. ISBN 5-86225-458-7.

¹² Общая теория статистики: Учебник / Под ред. чл.-корр. РАН И.И. Елисевой. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Финансы и статистика, 2001. - 480 с.

Таблица 1

Классификация ППК по величине субсидий
на пассажирооборот за период 2021–2022 года [11]

Наименование	Руб./пасс.-км за 2021 г.	Наименование	Руб./пасс.-км за 2022 г.
Первая группа – 26,09 %: «зеленая зона»			
Северо–Западная ППК	0,10	Северо–Западная ППК	0,15
Кубань Экспресс–Пригород	0,45	Свердловская ПК	0,32
Экспресс–Пригород	0,732	Кубань Экспресс–Пригород	0,38
Свердловская ПК	0,733	Центральная ППК	0,78
Центральная ППК	0,89	Экспресс–Пригород	0,92
Алтай–пригород	1,09	Алтай–пригород	1,26
Вторая группа – 47,82 %: «центральная (желтая) зона»			
Омск–пригород	1,10	Самарская ППК	1,43
Волго–Вятская ППК	1,26	Омск–пригород	1,53
Самарская ППК	1,29	Волго–Вятская ППК	1,54
Содружество ППК	1,81	Северо–Кавказская ППК	1,58
Пермская ПК	2,07	Содружество ППК	1,82
Северо–Кавказская ППК	2,25	Пермская ПК	2,447
Краспригород	2,42	Краспригород	2,453
Экспресс Приморья	2,48	Экспресс Приморья	2,52
Кузбасс–Пригород	2,49	Калининградская ППК	2,77
Калининградская ППК	2,68	Волгоградтранспригород	3,07
Волгоградтранспригород	3,37	Байкальская ППК	3,11
Третья группа – 26,09 %: «красная зона»			
Байкальская ППК	3,47	Кузбасс–Пригород	3,22
ППК Черноземье	4,20	Башкортостанская ППК	4,82
Башкортостанская ППК	4,95	ППК Черноземье	5,22
Северная ППК	5,55	Северная ППК	5,91
Забайкальская ППК	11,84	Забайкальская ППК	13,92
ПК Сахалин (пригородное сообщение)	20,55	ПК Сахалин (пригородное сообщение)	14,09

Источник: составлено авторами на основе предшествующих публикаций [11], данных ^{5, 6, 7, 10}.

Таблица 2

АВС-анализ структуры субсидирования ППК за 2021–2022 годы

ППК	Субсидии на пассажирооборот, руб./пасс. -км		Среднее значение, руб./пасс.-км	Удельный вес, %	Накопленная величина, %	Группа
	2021 г.	2022 г.				
1	20,55	14,09	17,32	22,64	22,64	А
2	11,84	13,92	12,88	16,83	39,47	А
3	5,55	5,91	5,73	7,49	46,96	А
4	4,95	4,82	4,88	6,38	53,34	В
5	4,20	5,22	4,71	6,15	59,50	В
6	3,47	3,11	3,29	4,30	63,80	В
7	3,37	3,07	3,22	4,21	68,01	В
8	2,49	3,22	2,86	3,73	71,74	В
9	2,68	2,77	2,72	3,56	75,30	В
10	2,48	2,52	2,50	3,26	78,56	В
11	2,42	2,45	2,44	3,18	81,75	С
12	2,07	2,45	2,26	2,95	84,70	С
13	2,25	1,58	1,92	2,51	87,20	С
14	1,81	1,82	1,81	2,37	89,57	С
15	1,26	1,54	1,40	1,83	91,40	С
16	1,29	1,43	1,36	1,78	93,18	С
17	1,10	1,53	1,31	1,72	94,90	С
18	1,09	1,26	1,18	1,54	96,44	С
19	0,89	0,78	0,84	1,09	97,53	С
20	0,73	0,92	0,82	1,08	98,60	С
21	0,73	0,32	0,53	0,69	99,29	С
22	0,45	0,38	0,42	0,54	99,83	С
23	0,10	0,15	0,13	0,17	100,00	С
Итого:	–	–	76,51	100,00	–	–

Источник: составлено авторами по данным ^{5, 6, 7, 10}



Таблица 3

XYZ-анализ структуры субсидирования ППК за 2021–2022 годы

Наименование	Среднее значение, руб./пасс.-км	Дисперсия	Среднеквадратическое отклонение	Коэффициент вариации, %	Группа
1	17,32	10,4287	3,2293	18,65	Y
2	12,88	1,0758	1,0372	8,05	X
3	5,73	0,0325	0,1803	3,15	X
4	4,88	0,0046	0,0676	1,39	X
5	4,71	0,2571	0,5071	10,77	Y
6	3,29	0,0318	0,1782	5,41	X
7	3,22	0,0218	0,1475	4,58	X
8	2,86	0,1329	0,3646	12,76	Y
9	2,72	0,0022	0,0473	1,74	X
10	2,50	0,0003	0,0186	0,74	X
11	2,44	0,0003	0,0179	0,74	X
12	2,26	0,0357	0,1890	8,37	X
13	1,92	0,1111	0,3333	17,39	Y
14	1,81	0,0000	0,0069	0,38	X
15	1,40	0,0197	0,1405	10,02	Y
16	1,36	0,0046	0,0678	4,99	X
17	1,31	0,0449	0,2118	16,12	Y
18	1,18	0,0071	0,0843	7,16	X
19	0,84	0,0031	0,0558	6,68	X
20	0,82	0,0085	0,0920	11,17	Y
21	0,53	0,0426	0,2065	39,24	Z
22	0,42	0,0014	0,0375	9,04	X
23	0,13	0,0008	0,0276	21,86	Y
Итого:	3,33	–	–	–	–

Источник: составлено авторами.

Таблица 4

Классификация ППК по величине субсидий на пассажирооборот на основе ABC–XYZ-анализа за период 2021–2022 годы

Наименование группы	Наименование компании	Удельный вес, %	Средняя величина субсидии по группе, руб./пасс.-км
AX	2, 3	8,70	9,30
BX	4, 6, 7, 9, 10	21,74	3,32
CX	11, 12, 14, 16, 18, 19, 22	30,43	1,47
AY	1	4,35	17,32
BY	5, 8	8,70	3,78
CY	13, 15, 17, 20, 23	21,74	1,12
AZ	–	–	–
BZ	–	–	–
CZ	21	4,35	0,53
Итого:	–	100,00	–

Источник: составлено авторами по данным ^{6, 7, 10} и вышеприведенных таблиц.

ции, а, следовательно, будущий переход в группу CY или дальнейший рост эффективности при нахождении в группе CZ.

Сопоставляя результаты применения субсидий за тарифное регулирование у перевозчиков пригородного и дальнего следования, уровню субсидии на пассажирооборот в регулируемом сегменте АО «ФПК» – 0,26 руб./пасс.-км за 2022 год ⁴, соответствуют только ППК, входящие в нижний квартиль или группы CY и CZ ABC–XYZ-анализа, а именно ППК23 и ППК 21.

По результатам анализа результатов деятельности ППК за 2021–2022 годы можно

сделать вывод о сильной зависимости в рассмотренный период пригородных пассажирских перевозчиков от исполнения бюджетом обязательства по возмещению потерь от государственного регулирования тарифов [5; 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты классификации субъектов пригородного пассажирского комплекса в рассмотренном периоде показали диспропорцию в обеспечении субсидиями компаний-перевозчиков, что влечет риски снижения качества транспортного обслуживания населения

и эффективности работы транспортной системы регионов.

Квартильный и ABC–XYZ-анализ пригородного пассажирского комплекса, проведенный применительно к определенному временному периоду, может при условии регулярности и системности его осуществления послужить основой для принятия управленческих решений по дальнейшему реформированию и развитию пригородного пассажирского комплекса в интересах пассажиров и экономики России. Предложенная авторами классификация ППК на основе ABC–XYZ-анализа информирует участников и регуляторов рынка пассажирских перевозок о степени эффективности использования получаемых компенсаций и целесообразности выделения определенных объемов государственной поддержки пригородного железнодорожного транспорта. При этом оценка в целях принятия управленческих решений безусловно должна носить комплексный характер, во внимание должна приниматься совокупность других факторов социально-экономического и иного характера.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ:

1. Шнейдер М. А., Проскуракова Е. А. Рынок пригородных железнодорожных перевозок. Управление и экономика: Монография. – СПб.: Изд-во ООО «Типография «НП-Принт», 2012. – 288 с. ISBN 978-5-905942-17-4.
2. Кобылицкий А. Н. Формирование рынка транспортных услуг Дальневосточного федерального округа в сфере пригородных железнодорожных перевозок / Автореф. ... канд. экон. наук. – Хабаровск: ДВГУПС, 2012. – 24 с.
3. Zhou, Y., He, S., Wang, X. [et al]. Optimization of Heterogeneous Passenger Subway Transfer Timetable Considering Social Equity. *Urban Rail Transit*, 2023, Vol. 9, pp. 246–265. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-023-00198-x>.
4. Taylor, B. D., Morris, E. A. Public transportation objectives and rider demographics: are transit's priorities poor public policy? *Transportation*, 2015, Vol. 42 (2), pp. 347–367. DOI: [10.1007/s11116-014-9547-0](https://doi.org/10.1007/s11116-014-9547-0).
5. Соколов Ю. И., Колядин Д. Г., Шукин В. В., Подоплелова Я. В. Направления совершенствования методов государственного регулирования рынка пригородных пассажирских перевозок // Транспортное дело России. – 2023. – № 1. – С. 283–285. DOI: [10.52375/20728689_2023_1_283](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_1_283).
6. Шкурина Л. В., Воблова Т. В., Беряков С. Н. Теоретико-методологические основы финансирования транспортной инфраструктуры регионов // Экономика и предпринимательство. – 2019. – № 2 (103). – С. 381–383. EDN: ZBXUST.
7. Терешина Н. П., Третьяк В. П., Чуверина О. Г. К вопросу о функционировании квазинтегрированных структур в условиях создания и единой цифровой платформы пригородного комплекса // Транспортное дело России. – 2023. – № 6. – С. 154–157. EDN: UVJAXZ. DOI: [10.52375/20728689_2023_6_154](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_6_154).
8. Лapidус Б. М., Мачерет Д. А. Методология оценки и обеспечения эффективности инновационных транспортных систем // Экономика железных дорог. – 2016. – № 7. – С. 16–25. EDN: WHNILD.
9. Персианов В. А., Орлюк А. А., Сакульева Т. Н. Государственное регулирование на транспорте: сквозь призму общественного блага // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сб. – 2015. – № 3. – С. 15–19. EDN: TJGSTX.
10. Подсорин В. А., Буровцев В. В., Кобылицкий А. Н., Куранова А. А. Результаты работы пригородного пассажирского комплекса России: экономический, технологический и региональный аспекты // Транспортное дело России. – 2023. – № 6. – С. 84–87. EDN: UOCDKN. DOI: [10.52375/20728689_2023_6_84](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_6_84).
11. Подсорин В. А., Буровцев В. В., Кобылицкий А. Н., Куранова А. А. Оценка распределения субсидий в пригородном пассажирском комплексе России на основе технико-экономического обоснования результатов его деятельности // Транспортное дело России. – 2023. – № 6. – С. 202–205. EDN: IZVWJM. DOI: [10.52375/20728689_2023_6_202](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_6_202).
12. Рачек С. В., Зубкова А. Ф., Федченко А. Д. Совершенствование организационно-экономического механизма железнодорожных пассажирских перевозок // Известия Уральского государственного экономического университета. – 2012. – № 2 (40). – С. 25–30. EDN: PEJAGF.
13. Мирошниченко О. Ф., Огинская А. Е. Совершенствование системы тарификации услуг инфраструктуры для пассажирских перевозчиков // Экономика железных дорог. – 2015. – № 7. – С. 43–53. EDN: UAECJJ.
14. Савруков А. Н., Савруков Н. Т. Оценка состояния и уровня развития транспортной инфраструктуры в субъектах РФ // Финансы и кредит. – 2021. – Т. 27. – № 6 (810). – С. 1204–1219. EDN: FVXVAL. DOI: [10.24891/fin.27.6.1204](https://doi.org/10.24891/fin.27.6.1204).
15. Филимонова З. В., Сафронов С. А., Поликарпов А. А. [и др.] Корреляционный анализ основных показателей деятельности пассажирских пригородных компаний в период нестабильного спроса // Экономика железных дорог. – 2023. – № 12. – С. 33–44. EDN: PDHDCS.
16. Серова Н. А. Методический подход к оценке развития региональной транспортной инфраструктуры // Фундаментальные исследования. – 2022. – № 10–2. – С. 229–232. EDN: YAFIHN. DOI: [10.17513/fin.43371](https://doi.org/10.17513/fin.43371).
17. Мачерет Д. А., Кудрявцева А. В. Экономический аспект взаимодействия железных дорог с другими видами транспорта на рынке перевозок // Транспортное дело России. – 2024. – № 1. – С. 70–74. EDN: JIWHFS.

Информация об авторах:

Подсорин Виктор Александрович – доктор экономических наук, профессор кафедры экономики и управления на транспорте Российского университета транспорта, Москва, Россия, podsorin@mail.ru.

Буровцев Владимир Викторович – доктор экономических наук, профессор кафедры менеджмента Дальневосточного государственного университета путей сообщения, Хабаровск, Россия, burovtsevv@mail.ru.

Кобылицкий Андрей Николаевич – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и коммерции Дальневосточного государственного университета путей сообщения, Хабаровск, Россия, akobylitsky@mail.ru.

Куранова Анастасия Алексеевна – студентка Дальневосточного государственного университета путей сообщения, Хабаровск, Россия, kuranova-nastya@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 26.12.2023, одобрена после рецензирования 08.04.2024, принята к публикации 12.08.2024.





Влияние составности поездов на характер воздействия факторов, влияющих на энергопотребление



Виктория ВИТОВСКАЯ



Алексей ДАВЫДОВ



Александр КОМЯКОВ

Виктория Витальевна Витовская¹, Алексей Игоревич Давыдов², Александр Анатольевич Комяков³

^{1, 2, 3} Омский государственный университет путей сообщения, Омск, Россия.

¹ ORCID: 0009-0001-3232-286X; Web of Science Researcher ID: HSH-1681-2023; РИНЦ SPIN-код: 2483-1615; РИНЦ Author ID: 1191684.

² ORCID: 0000-0002-8842-2800; Web of Science Researcher ID: E-1446-2019; РИНЦ SPIN-код: 9039-4400; РИНЦ Author ID: 653459.

³ ORCID: 0000-0002-1960-3018; Web of Science Researcher ID: N-8824-2016; РИНЦ SPIN-код: 3775-1920; РИНЦ Author ID: 514132.

✉ ¹ vitovskaya.99@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

В настоящее время разработка технических и пооперационных норм удельного расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, эксплуатируемых на железных дорогах Российской Федерации и стран СНГ, ведется методами, разработанными еще в 60-е гг. XX века. Использование при расчете норм современных методов интеллектуального анализа данных предполагает предварительное исследование и выбор факторов, оказывающих значительное влияние на величину расхода топливно-энергетических ресурсов.

Настоящее исследование направлено на выявление различий в характере воздействия показателей использования локомотивов, таких как участковая и техническая скорость, масса состава, нагрузка на ось, на величину удельного расхода электроэнергии на тягу поездов для различных типов железнодорожного грузового подвижного состава. Особое внимание в статье уделяется определению характера влияния факторов на удельный расход электроэнергии контейнерных поездов.

В работе нашли применение метод статистической обработки данных Стьюдента, используемый для определения однородности исследуемых выборок, и метод корреляционного анализа Пирсона в части определения коэффициентов корреляции между

удельным расходом электроэнергии на тягу поездов и факторами, предположительно влияющими на величину этого расхода. Регрессионные модели, описывающие зависимость удельного расхода электроэнергии на тягу поездов от рассматриваемых влияющих факторов, построены с использованием метода множественной линейной регрессии.

Статья содержит результаты проверки однородности исследуемых выборок удельного расхода электроэнергии в виде значений t-критерия Стьюдента, диаграммы рассеяния величины удельного расхода электроэнергии в зависимости от величины влияющих факторов, описание величин рассчитанных коэффициентов корреляции для каждой исследуемой группы грузовых поездов. Уделяется внимание возможным причинам различия в характере и степени воздействия факторов для разных типов грузового подвижного состава.

Проведенное исследование аргументирует необходимость разработки методики нормирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов, позволяющей учесть влияние составности поездов с использованием современных методов анализа данных.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, анализ энергопотребления, нормирование энергопотребления, составность поездов, корреляционный анализ, контейнерные поезда.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках государственного задания № 109-00004-24-02 (научная тема ЕКТУ-2023-0003) по теме «Разработка концептуальной модели системы поддержки принятия решений в области анализа и прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов».

Для цитирования: Витовская В. В., Давыдов А. И., Комяков А. А. Влияние составности поездов на характер воздействия факторов, влияющих на энергопотребление // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 76–83. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-10>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время процесс анализа, планирования и нормирования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) на тягу поездов на железных дорогах Российской Федерации и стран СНГ регламентируется различными нормативными документами в области планирования, нормирования, анализа и прогнозирования расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов¹.

В рамках выделенных лимитов финансирования с учетом планового объема перевозочной работы на предприятии определяется планируемый объем потребления ТЭР на тягу поездов. Далее рассчитываются соответствующие объемы на различных уровнях организационной структуры железнодорожной отрасли. В качестве основного показателя энергоемкости перевозочного процесса на уровне поездки используется удельный расход ТЭР – отношение объема энергопотребления к объему работы, выраженной в соответствующих единицах.

В целях мотивации причастных подразделений к выполнению плановых объемов расхода ТЭР устанавливаются нормы удельного расхода ТЭР на тягу поездов – по видам ресурсов (электроэнергия, дизельное топливо, газ, мазут, уголь); по уровню нормирования (технические, пооперационные для локомотивных бригад, групповые для уровня структурных подразделений и выше); по видам тяги; по видам движения и выполняемой работы; по участкам работы и по периодам нормирования.

Важнейшим направлением для анализа энергетической эффективности перевозочного процесса является установление технических и пооперационных норм для поездок локомотивных бригад. Технические нормы удельного расхода ТЭР разрабатываются на основе режимных карт в зависимости от серии подвижного состава для каждого участка работы, в зависимости от профиля с градацией по массе поезда, а также нагрузке на ось или составности поезда. Основой для определения

технических норм являются опытные поездки тягово-энергетических лабораторий, данные энергооптимальных режимов вождения поездов (с помощью автоматизированных систем построения энергооптимальных графиков движения поездов), а также тяговые расчеты, выполняемые как в ручном режиме, так и с применением современных программных средств. Пооперационные нормы удельного расхода ТЭР разрабатываются для учета условий поездки, отличающихся от среднестатистических, заложенных в техническую норму. Пооперационные нормы учитывают энергопотребление на отдельные технологические операции, такие как простой подвижного состава в рабочем состоянии, нагон опоздания пассажирских и грузовых поездов для вхождения в расписание, прогрев вагонов моторвагонного подвижного состава в пунктах отстоя, выполнение предупреждений об ограничении скорости, остановки у запрещающих сигналов, неграфиковые остановки, опробование тормозов поезда в пути следования после длительной стоянки, не предусмотренной графиком движения поездов, и т.д.

В связи со значительной сложностью выполнения поездок с привлечением тягово-энергетической лаборатории и применения программных комплексов для выполнения тяговых расчетов, на практике машинистами-инструкторами по теплотехнической работе широко применяется статистический метод определения технических норм удельного расхода ТЭР. При этом из генеральной совокупности поездок каждой серии ТПС, в соответствующем виде движения, с поездами соответствующей массы (или с соответствующей нагрузкой на ось вагона) по конкретному поездоучастку отбираются те, которые, по мнению машиниста-инструктора, являются образцовыми и выполнены в среднестатистических условиях. Среднее значение удельного расхода ТЭР по указанным выборкам определяется с учетом коэффициентов учета сезонности, погодных условий, применения оптимальных методов ведения поезда (определяемых на основе метода экспертных оценок) и считается удельной нормой, которая может быть скорректирована при отклонении от учитываемых условий выполнения поездок. Таким образом, значение рассчитанной удельной нормы энергопотребления на тягу поездов содержит в себе существенную долю субъективизма, а выбранные поездки могут

¹ См. напр: СТП БЧ 17.217–2012 Расчет норм расхода дизельного топлива на тягу поездов для подразделений локомотивного хозяйства Белорусской железной дороги. – Минск: Министерство транспорта и коммуникаций Республики Беларусь, 2012. – 23 с; Положение о планировании и нормировании расхода топливно-энергетических ресурсов на тягу поездов в ОАО «РЖД». Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 17 мая 2019 г. № 962/р.



не до конца учитывать потенциал методов энергоэффективного ведения поезда и содержать в себе ошибки нормирования предыдущих временных периодов. Кроме того, при модернизации системы анализа и нормирования энергопотребления на тягу поездов необходимо учесть возможности современных вычислительных средств, а также методы интеллектуального анализа данных.

Целью работы было исследование различий в характере влияния факторов на величину удельного расхода электроэнергии (УРЭ) для наиболее широко эксплуатируемых на железных дорогах России и стран СНГ типов грузовых поездов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Определению и изучению факторов, влияющих на энергопотребление поезда, посвящено множество зарубежных [1–8] и отечественных исследований [9–15].

Традиционно исследуется воздействие на величину удельного расхода электроэнергии $w_{уд}$ следующих показателей использования локомотивов: участковой скорости $V_{уч}$, технической скорости V_{tex} , массы состава m_c , нагрузки на ось q . С целью определения характера воздействия на величину УРЭ перечисленных факторов проводится анализ данных о более чем 9000 поездках электропоездов, произведенных локомотивными бригадами одного из эксплуатационных локомотивных депо Западно-Сибирской железной дороги за период с октября 2022 по апрель 2023 гг. Основным источником информации о величинах влияющих факторов являются данные системы централизованной обработки маршрута машиниста (ЦОММ). С использованием табличного процессора Microsoft Excel и языка программирования Visual Basic for Applications производится расчет величины ряда факторов, информация о которых содержится в отчетных формах в неявном виде (УРЭ, масса состава, нагрузка на ось).

Исследование характера влияния факторов ведется для 5 групп поездов: общей совокупности всех типов грузовых поездов (1 группа), сквозных поездов (2 группа), сквозных поездов массой больше 5500 т (3 группа) и меньше 5500 т (4 группа) и контейнерных поездов (5 группа). Такое деление обусловлено наличием ряда отличительных признаков в организации перевозочного процесса для подвижного состава, представляющего

каждую группу. Например, сквозные поезда массой больше 5500 т часто являются составами с наливными грузами, составами с высоким коэффициентом использования грузоподъемности вагона. В свою очередь контейнерные поезда имеют следующие отличительные особенности: низкая величина нагрузки на ось вагона, относительно малая масса составов, использование особого вида подвижного состава – платформ – для перевозки контейнеров. Сквозные поезда массой меньше 5500 т выделяются в отдельную группу по причине наличия сходных признаков с контейнерными поездами – малая масса и нагрузка на ось. Совокупность данных, представляющих группу 1, является генеральной выборкой в данном исследовании. Выборка второй группы содержит данные о поездках всех сквозных поездов, исключая данные о поездках контейнерных поездов.

Для проверки наличия зависимости характера воздействия факторов от типа подвижного состава, исследуем однородность выборок по УРЭ групп 2 и 5 и групп 4 и 5 поездов методом t -критерия Стьюдента [16]. Применение традиционного метода статистического анализа допустимо, так как выборки независимы друг от друга, а число наблюдений в выборках большое [17].

Перед проведением корреляционного анализа были построены диаграммы рассеяния $w_{уд}$ в зависимости от величины исследуемых влияющих факторов.

Определение степени влияния и характера воздействия факторов проводится методом корреляционного анализа Пирсона, включающим расчет коэффициентов корреляции r и построение корреляционных матриц.

Расчет коэффициента корреляции ведется по выражению:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x \cdot S_y \cdot (n-1)}, \quad (1)$$

где x_i, y_i – значения случайных величин;
 \bar{x}, \bar{y} – средние значения случайных величин;

n – объем выборки;

S_x, S_y – средние квадратические отклонения случайных величин.

Оценка силы корреляционной связи осуществляется в соответствии со шкалой Чеддока.

Построение регрессионных моделей для УРЭ по четырем исследуемым факторам ве-

Таблица 1

Эмпирические значения t -критерия для исследуемых выборок [получено авторами]

Период	Исследуемые выборки			
	группы 2 и 5		группы 4 и 5	
	нечетное направление	четное направление	нечетное направление	четное направление
Январь	-7,89	-8,69	1,12	-3,89
Февраль	-5,13	-3,06	1,23	0,08
Март	-5,92	-2,6	-0,73	0,13
Апрель	-5,76	-3,54	-0,09	-0,55
Октябрь	-4,1	-7,76	3,01	-3,46
Ноябрь	-3,76	-4,28	4,88	-1,05
Декабрь	-4,83	-5,46	4,15	-1,07
7 месяцев	-13,78	-13,08	5,25	-3,65

дется методом множественной линейной регрессии. В работе выполняется построение двух регрессионных моделей. Первая модель реализуется на основе данных генеральной совокупности, вторая – по данным о поездках только контейнерных поездов. Выборки делятся на две части: данные о 80 % поездок используются непосредственно при построении модели, остальные 20 % (тестовая выборка) – при оценке точности модели. Общий вид, получаемых уравнений регрессии описывается выражением:

$$w_{уд} = \Delta_0 + \Delta_1 V_{уч} + \Delta_2 V_{max} + \Delta_3 m_c + \Delta_4 q, \quad (2)$$

где Δ_j – j -е коэффициенты уравнения регрессии.

Точность моделей проверяется на значениях УРЭ контейнерных поездов из тестовой выборки.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам статистического анализа Стьюдента составлена табл. 1, в которой отражены эмпирические $t_{эмп}$ значения t -критерия для исследуемых выборок. Критическое значение критерия $t_{крит}$ на уровне значимости 0,05, определенное по статистической таблице [18], равно 1,96 для всех исследуемых выборок, так как число степеней свободы в них превышает значение 120.

Согласно данным табл. 1, все исследуемые выборки УРЭ групп 2 и 5 оказались неоднородными. При сравнении с выборками УРЭ групп 4 и 5 выборки являются однородными в 9 из 16 случаев. Наличие неоднородности сравниваемых выборок позволяет сделать вывод о различиях в характере воздействия на величину УРЭ влияющих факторов (массы состава, нагрузки на ось, скорости движения поезда и т.д.) для исследуемых типов грузовых поездов. Причем неоднородность с выборками поез-

дов группы 4 может означать, что причиной отличий в характере воздействия влияющих факторов на контейнерные поезда по сравнению с другими является не только их относительно небольшая масса.

Перед проведением корреляционного анализа были исследованы диаграммы рассеяния величины УРЭ в зависимости от величины влияющих факторов. В качестве примера на рис. 1 приведены диаграммы рассеяния для поездок, произведенных в апреле 2023 года для исследуемой группы 1. Диаграммы имеют схожий вид для всех исследуемых групп поездов.

Визуальный анализ диаграмм рассеяния позволяет предположить слабую и очень слабую корреляционную связь между $w_{уд}$ и $V_{уч}$ (рис. 1а), между $w_{уд}$ и $V_{тех}$ (рис. 1б) средней и сильную связь $w_{уд}$ с m_c (рис. 1в) и $w_{уд}$ с q (рис. 1г)

Рассмотрим результаты исследования корреляционных связей между $w_{уд}$ и участковой $V_{уч}$ и технической $V_{тех}$ скоростями, массой состава m_c и нагрузкой на ось q .

Участковая скорость $V_{уч}$ представляет собой среднее значение скорости поезда с учетом времени остановок, времени на замедления и разгоны. Техническая скорость $V_{тех}$ в отличие от участковой не учитывает время стоянок. В зависимости от выбранного режима ведения поезда увеличение средней скорости движения может приводить как к возрастанию, так и к уменьшению УРЭ [19]. Анализ показал, что корреляционная связь между УРЭ и участковой $V_{уч}$ и технической скоростью $V_{тех}$ характеризуется как слабая. Коэффициент корреляции с участковой скоростью $r_{V_{уч}}$ изменяется в диапазоне от –0,17 до 0,09, коэффициент корреляции с технической скоростью $r_{V_{тех}}$ – в диапазоне от –0,12 до 0,11. Наибольшие



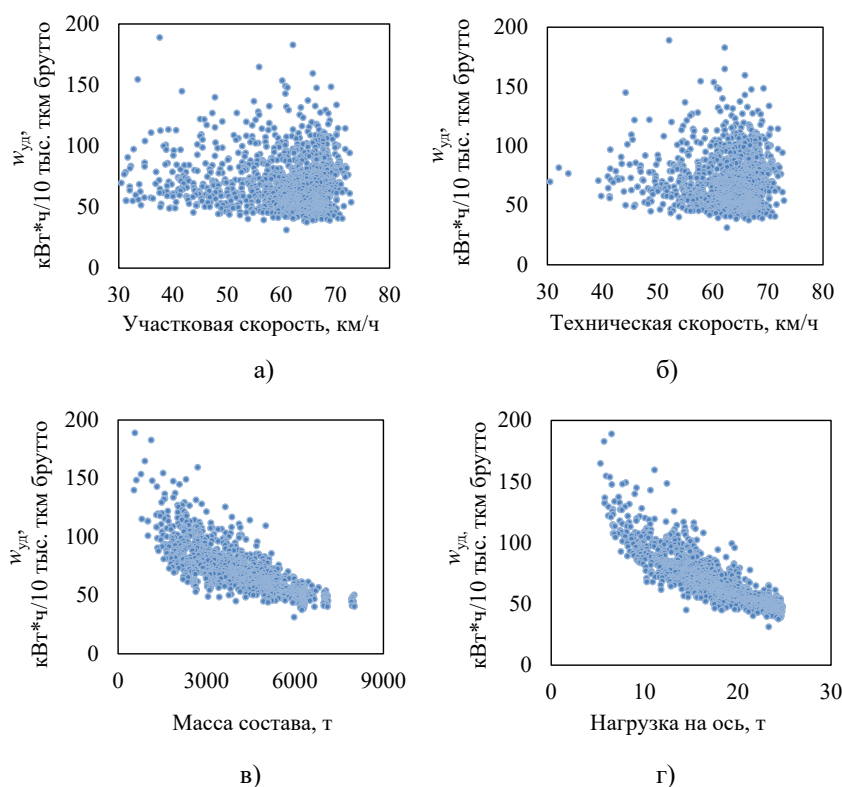


Рис. 1. Диаграммы рассеяния значений $w_{уд}$ в зависимости от величины:
а) – участковой скорости $V_{уч}$, б) – технической скорости $V_{тех}$,
в) – массы состава m_c , г) – нагрузки на ось q [получено авторами].

по модулю отрицательные коэффициенты корреляции характерны для поездов группы 3, а наибольшие положительные – для поездов групп 4 и 5.

Отмечается отрицательный характер влияния на УРЭ участковой и технической скорости для поездов группы 3, который может быть связан со значительными энергетическими затратами на разгон поездов массой больше 5500 т после остановки. Существование статистически значимых положительных коэффициентов корреляции для скоростей контейнерных поездов и поездов массой меньше 5500 т связано с тем, что поезда наименьшей массы в этих группах, имеющие, как правило, больший удельный расход, имеют и наибольшую скорость.

Корреляционная связь между УРЭ и массой состава, согласно диаграмме рассеяния на рис. 1в, должна характеризоваться как сильная или очень сильная. Проведенный корреляционный анализ дал следующие результаты:

- коэффициент корреляции УРЭ с массой состава r_m имеет отрицательные значения

для всех исследуемых групп поездов в каждый период времени;

- модуль коэффициента корреляции r_m имеет наибольшие значения для групп 1 и 4 и изменяется в диапазоне от 0,91 до 0,67 с преобладанием сильной корреляционной связи;

- наименьшими значениями модуля коэффициента корреляции, в диапазоне от 0,60 до 0,21 с преобладанием средней корреляционной связи, характеризуются поезда групп 3 и 5, при том, что средние массы этих групп отличаются более чем в два раза.

На рис. 2 приведен график зависимости УРЭ от m_c для поездов за октябрь. Меньшие значения r_m для поездов группы 3 могут быть обусловлены тем, что для электровоза при больших массах состава создаются условия работы в режиме, близком к номинальному, где токовые нагрузки имеют оптимальные значения. Дальнейшее увеличение массы состава будет приводить к увеличению УРЭ [20].

Диапазону значений оптимальных по величине УРЭ масс соответствует горизонталь-

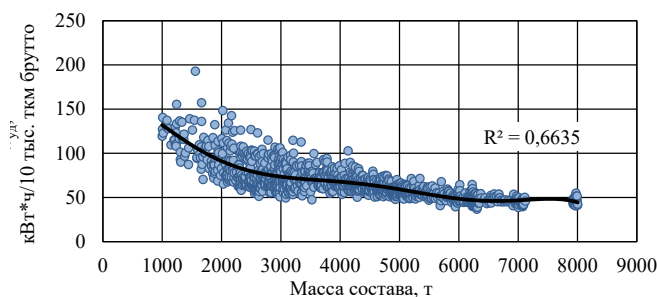
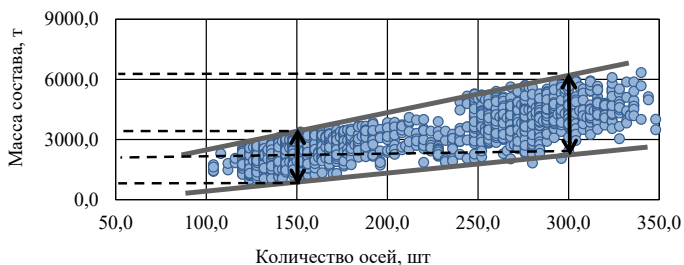
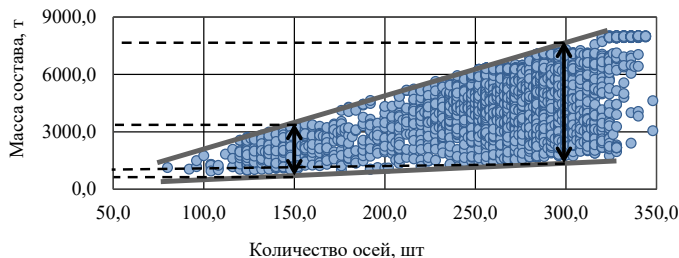


Рис. 2. Зависимость удельного расхода электроэнергии от массы состава [получено авторами].



а



б

Рис. 3. Диапазон масс на количество осей для: а – контейнерных поездов, б – грузовых поездов [получено авторами]

ный участок аппроксимирующей кривой. Кривая, пройдя точку минимума, начнет возрастать. Однако это не нашло отражения на рис. 2, так как отсутствуют данные о работе составов массой более 9000 т на исследуемом участке.

Для выяснения причины более слабого характера влияния изменения m_c на УРЭ для контейнерных поездов были построены диаграммы рассеяния масс составов в зависимости от количества осей для контейнерных поездов (рис. 3а) и совокупности остальных групп грузовых поездов (рис. 3б).

Исходя из диапазона изменения масс для каждого количества осей на рис. 3а, увеличение массы контейнерных поездов производится в основном за счет увеличения количества осей. Изменение массы у остальных грузовых поездов производится в большей степени, чем у контейнерных поездов, за счет увеличения нагрузки на ось. Этим может объ-

ясняться более слабый характер влияния увеличения m_c на снижение УРЭ для контейнерных поездов.

Увеличение m_c за счет добавления осей приводит к большему возрастанию сопротивления движению поезда, чем за счет повышения q , так как некоторые составляющие основного сопротивления движению поезда не зависят от q , например, воздушное сопротивление.

Корреляционный анализ взаимосвязи величины УРЭ и нагрузки на ось вагона q имеет следующие результаты:

- коэффициент корреляции УРЭ с нагрузкой на ось r_q как и r_m имеет отрицательные значения для всех исследуемых выборок;
- модуль коэффициента корреляции r_q имеет наибольшие значения для тех же групп поездов, что и модуль r_m и изменяется в диапазоне от 0,83 до 0,91;



Таблица 2

Результаты построения и проверки регрессионных моделей [получены авторами]

	Δ_j -коэффициент	p-значение	R^2	δ , %
Модель 1(на основе данных о всех поездках)				
Δ_0	133,223		0,81	10,77
$V_{уч}$	-0,102	0,018		
$V_{тех}$	0,179	0,001		
m_c	-0,003	0		
q	-3,192	0		
Модель 2 (на основе данных о поездках контейнерных поездов)				
Δ_0	146,793		0,65	9,92
$V_{уч}$	-0,097	0,251		
$V_{тех}$	0,165	0,108		
m_c	-0,006	0		
q	-3,579	0		

– наименьшими значениями модуля коэффициента корреляции, в диапазоне от 0,44 до 0,78 с преобладанием средней корреляционной связи, характеризуются поездками групп 4 и 5;

– модули r_q для контейнерных поездов имеют значения в среднем в 1,4 раза большие, чем модули r_m , для остальных групп поездов – в среднем в 1,2 раза.

Результаты построения регрессионных моделей представлены в табл. 2, в которой сведены значения Δ коэффициентов регрессии, коэффициентов детерминации R^2 , p -значения, а также средние значения относительных погрешностей моделей δ .

Применение модели 1 для расчета $w_{уд}$ контейнерных поездов дало среднее значение относительной погрешности 10,77 %, при том, что в генеральной совокупности поездки контейнерных поездов составляют 25,9 %.

Исходя из значения R^2 , полученного для модели 2, только 65 % дисперсии $w_{уд}$ можно объяснить рассматриваемыми факторами. Исключение переменных $V_{уч}$ и $V_{тех}$ не повышает значение R^2 , однако стандартная ошибка регрессии снижается с 3,41 до 1,29. Для повышения точности второй модели необходимо учесть и другие влияющие факторы, например, погодные условия.

Предварительный регрессионный анализ, с учетом дополнительных факторов показал, что возможно снижение δ до 4,87 % для модели 2 и до 9,31 % для модели 1. Вторая модель имеет больший потенциал к повышению точности при включении в нее факторов погодных условий, что является предметом

дальнейших исследований. С целью подтверждения наличия зависимости между характером влияния факторов на величину удельного расхода энергоресурсов и составностью поездов, требуется проведение аналогичных исследований для других поездоучастков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используемые в настоящее время на железных дорогах Российской Федерации и стран СНГ подходы к анализу, планированию и нормированию ТЭР не позволяют производить расчет прогнозных значений потребления ТЭР на тягу с учетом составности поездов.

В статье были проанализированы данные о поездках, совершенных на территории Российской Федерации в границах Западно-Сибирской железной дороги. Проверка данных удельного расхода электроэнергии методом Стюдента для различных типов грузовых поездов показала наличие неоднородности исследуемых выборок. Проведенный корреляционный анализ Пирсона позволил описать характер и степень воздействия влияющих факторов на удельный расход электроэнергии исследуемых типов грузовых поездов. Отмечаются существенные различия во влиянии величины массы состава и осевой нагрузки на удельный расход электроэнергии для контейнерных поездов и поездов массой больше 5500 т.

Выделение поездов по характерным признакам в отдельные группы позволяет производить индивидуальный подбор влияющих

факторов, оказывающих значимое воздействие на энергопотребление. Это дает возможность повысить точность моделей прогнозирования значений удельного расхода энергоресурсов для каждого типа поездов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ren Junhua, Zhang Qing, Liu Feng. Analysis of factors affecting traction energy consumption of electric multiple unit trains based on data mining. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 262, 121374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121374>.
2. Fischer, S. Traction energy consumption of electric locomotives and electric multiple units at speed restrictions. *Acta Technica Jaurinensis*, 2015, Vol. 8, Iss. 3, pp. 240–256. DOI: <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v8.n3.3>.
3. Kampczyk, A., Gamon, W., Gawlak, K. Integration of Traction Electricity Consumption Determinants with Route Geometry and Vehicle Characteristics. *Energies*, 2023, Vol. 16, 2689. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062689>.
4. Pan Deng, Chen Zejun, Mei Meng. Energy efficiency emergence of high-speed train operation and systematic solutions for energy efficiency improvement. *SN Applied Sciences*, 2020, Vol. 2, article number 875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2692-5>.
5. Lukaszewicz, P. Running resistance—results and analysis of full-scale tests with passenger and freight trains in Sweden. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2007, Vol. 221, Iss. 2, pp. 183–193. DOI: 10.1243/0954409JRR89.
6. Рожков А. В., Суюнбаев Ш. М., Салфетников В. В., Балабаев О. Т., Нартов М. А. Определение дополнительного сопротивления движению поезда от элементов профиля железнодорожных подъездных путей промышленных предприятий // *Труды университета*. – 2022. – № 2 (87). – С. 211–216. DOI: 10.52209/1609-1825_2022_2_211.
7. Boschetti, G., Mariscotti, A. The Parameters of Motion Mechanical Equations as a Source of Uncertainty for Traction Systems Simulation. *XX IMEKO World Congress*, 2012, Busan, South Korea. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/265843501_The_parameters_of_motion_mechanical_equations_as_a_source_of_uncertainty_for_traction_systems_simulation. Доступ 19.01.2024.
8. Rochard, B., Schmid, F. A review of methods to measure and calculate train resistances. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2000, Vol. 214, Iss. 4, pp. 185–199. DOI: 10.1243/0954409001531306.
9. Сидорова Н. Н. Определение энергозатрат на неплановые остановки // *Мир транспорта*. – 2013. – Т. 11. – № 4 (48). – С. 48–51. EDN: PZREOZ.
10. Черемисин В. Т., Незевак В. Л., Саркенов С. С. Влияние тяговой нагрузки на электропотребление в системе тягового электроснабжения на участках с горным профилем пути // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2019. – № 1 (73). – С. 112–118. EDN: ZBKLRP.
11. Медлин Р. Я., Сидорова Е. А. Нормирование расхода энергоресурсов // *Электрическая и тепловозная тяга*. – 1989. – № 2. – С. 4.
12. Бакланов А. А., Доманов К. И., Есин Н. В. [и др.] Классификация факторов, влияющих на расход электроэнергии электроподвижным составом // *Инновационный транспорт*. – 2020. – № 4 (38). – С. 61–66. DOI: 10.20291/2311-164X-2020-4-61-66.
13. Шкурин К. М. Исследование влияния массы грузовых поездов на их участковую скорость // *Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт*. – 2018. – № 1 (36). – С. 70–72. EDN: YWINYD.
14. Исаев И. П., Сидорова Н. Н., Феоктистов В. П. Нормирование расхода энергии в грузовом движении на основе статистических методов // *Железнодорожный транспорт. Серия: Локомотивы и локомотивное хозяйство*. – 1988. – Вып. 5. – С. 1–15.
15. Сидорова Н. Н. Анализ энергоемкости перевозочного процесса в электрической тяге на основе многофакторной модели. // *Вестник МИИТ. Научно-технический журнал*. – 2000. – Вып. 5. – С. 23–27.
16. Гмурман В. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1977. – 429 с.
17. Орлов А. И. Проверка статистической гипотезы однородности математических ожиданий двух независимых выборок: критерий Крамера-Уэлча вместо критерия Стьюдента // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2015. – № 110 (06). – С. 197–218. [Электронный ресурс]: https://orlovs.pp.ru/work/901-1000/954_%20Критерий%20Крамера-Уэлча.pdf. Доступ 19.01.2024.
18. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука, 1965. – 464 с.
19. Бакланов А. А. Влияние скорости движения на энергозатраты грузовых поездов // *Известия Транссиба*. – 2018. – № 1 (33). – С. 2–12. EDN: XQXUWT.
20. Вильгельм А. С., Иванченко В. И., Комяков А. А., Штраухман А. А. Определение оптимальных значений эксплуатационных показателей электроподвижного состава по критерию энергоэффективности // *Известия Транссиба*. – 2021. – № 4 (48). – С. 85–96. [Электронный ресурс]: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2021-4\(48\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2021-4(48).pdf) [полный текст выпуска]. Доступ 19.01.2024. ●

Информация об авторах:

Витовская Виктория Витальевна – аспирантка кафедры теоретической электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия, vitovskaya.99@mail.ru.

Давыдов Алексей Игоревич – кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и компьютерной графики Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия, davydovai@bk.ru.

Комяков Александр Анатольевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической электротехники Омского государственного университета путей сообщения, Омск, Россия, tskot@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.01.2024, одобрена после рецензирования 26.03.2024, принята к публикации 30.03.2024.





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.07

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-11>

Стратегирование деятельности авиакомпаний

**Ольга Петровна Сушко**

Московский государственный технический университет гражданской авиации;
Российский экономический университет имени Г. В. Плеханова, Москва, Россия.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0865-6621>; Web of Science Researcher ID:
F-4750-2019; Scopus Author ID: 56747827800; РИНЦ SPIN-код: 5806-8449; РИНЦ
Author ID: 833150.

✉ osushko@mail.ru.

Ольга СУШКО

АННОТАЦИЯ

Необходимость адаптации и развития авиакомпаний в условиях сложной и динамичной среды предопределяет комплексное стратегирование деятельности с выявлением сильных и слабых сторон, возможностей и угроз. Цель исследования заключается в проведении комплексного анализа деятельности авиакомпании с выделением основных направлений развития, необходимых для разработки стратегии. Исследования были основаны на научных принципах системного подхода, для комплексного изучения различных аспектов деятельности были использованы разнообразные эмпирические методы, включая инструменты статистического анализа.

Схема стратегирования деятельности авиакомпаний включает анализ функционирования и декомпозицию проблем с последующим агрегированием и ранжированием стратегий развития. Подход к стратегированию деятельности авиакомпаний на основе обобщенного анализа внутренних и внешних факторов (IFAS/EFAS), OTSW-анализа показывает множество новых угроз. При этом основ-

ная стратегия развития авиакомпании (Махі/Махі) должна учитывать эффективное использование имеющихся возможностей и накопленного потенциала. Анализ OTSW, являясь методом стратегического планирования, основан на модификации SWOT-анализа, включает в себя изучение факторов внутренней и внешней среды. Для проведения данного анализа создается OTSW-матрица, которая позволяет сравнить внешние возможности и угрозы с внутренними сильными и слабыми сторонами, отобранными на основе оценок экспертов. По результатам такого анализа можно делать выводы о наличии у той или иной авиакомпании достаточного количества возможностей и потенциальных угроз, складывающихся под влиянием экономических, политических, социальных и технологических факторов. Основная стратегия развития авиакомпании должна быть направлена на использование имеющихся возможностей и потенциала (Махі/Махі), включая выявление, внедрение и реализацию наиболее перспективных стратегических направлений.

Ключевые слова: авиакомпания, стратегирование деятельности, OTSW-анализ, стратегия Махі/Махі.

Для цитирования: Сушко О. П. Стратегирование деятельности авиакомпании // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 84–93. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-11>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гражданская авиация имеет значимость для экономики любой страны, а для России с ее большой территорией и географическими масштабами данная отрасль предоставляет большие возможности для развития, а в некоторых ситуациях становится незаменимой. Так, для районов крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока гражданская авиация является основным средством транспортного сообщения с другими регионами страны.

Авиакомпании России реализуют утвержденные стратегические планы развития (рис. 1).

Научная проблема исследования определяется как комплексное стратегирование деятельности с выявлением сильных и слабых сторон, возможностей и угроз, решение которой позволит получить научно-обоснованные рекомендации по разработке стратегий развития авиакомпаний в условиях неопределенности. Объектом исследования является деятельность ведущих авиакомпаний Российской Федерации. Информационная база исследования включает статистические данные,

данные авиакомпаний и другие источники. Теоретико-методологическая база исследований основана на научных положениях системного подхода. В исследовании использовались эмпирические методы. Также в исследовании использовались экспертные методы и консультативные сессии со специалистами отрасли, которые позволили получить качественные оценки по вопросам стратегирования деятельности авиакомпаний. Научная новизна исследования определяется адаптацией применительно к стратегированию деятельности авиакомпаний методологии OTSW-анализа, метода Дельфи, обобщения внешних и внутренних факторов (IFAS/EFAS) и др.

ДИСКУССИЯ

Значимость темы повышения конкурентоспособности транспортных компаний определяет актуальность исследований стратегий их развития в современных условиях. В этом плане можно выделить ряд работ российских ученых, посвященных различным аспектам этого вопроса. Так, О. И. Донцова, А. В. Воло-

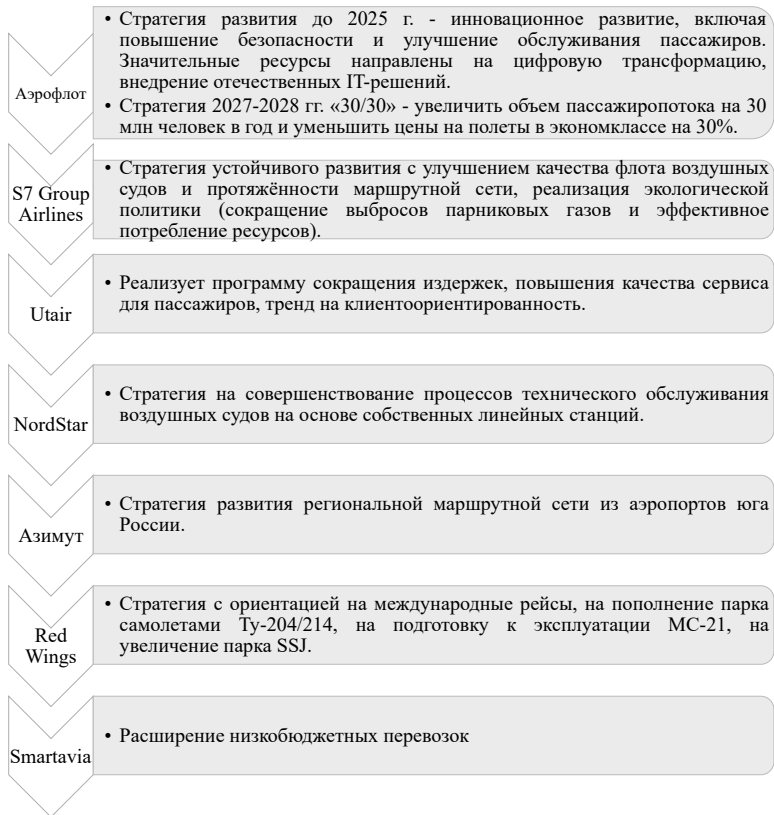


Рис. 1. Отдельные ключевые аспекты стратегических планов российских авиакомпаний [составлено автором на основе данных, находящихся в открытом доступе].



хов, Д. Е. Морковкин изучили глобальные перспективы развития авиации [1]. Д. Г. Кахриманова и М. А. Соколов исследовали тенденции развития авиаотрасли России [2]. М. М. Брутян провел анализ рынка гражданской авиации Индии и выделил перспективы его развития [3]. Исследования перспектив развития других видов транспорта также актуальны [4–7]. А. В. Королев обосновал подходы к разработке стратегии пассажирского транспорта в новых условиях интеграционного переустройства [8]. Теория разработки стратегий становится все более востребованной и направленной на практическое внедрение теоретических основ и методологических положений. Ю. В. Нестеров и А. Б. Фрайман установили важность парадигмы стратегического управления воздушным транспортом [9].

При этом методология стратегирования предприятий, отраслей, комплексов, регионов в современный период находится в стадии формирования. Основателем методологии стратегирования в российской науке и практике является В. Л. Квинт [10; 11]. В. Л. Квинт предлагает использовать как основу метод SWOT-анализа с дальнейшей декомпозицией факторов по уровням стратегических направлений, что позволяет разрабатывать эффективные стратегии развития [12; 13]. В стратегии большое внимание уделяется анализу факторов внешней и внутренней среды, поэтому многие исследователи проводят факторный анализ. Среди недавних работ, связанных с исследованием факторов среды, можно отметить работу И. В. Захаровой [14]. С. Е. Раменская и Ю. В. Фисун представили анализ выбора стратегии развития авиационной компании [15].

Несмотря на проводимые исследования, актуальность темы стратегирования деятельности и разработки эффективной стратегии развития авиакомпании, в том числе с учетом факторов неопределенности и постоянных политико-экономических изменений на внешних рынках, обуславливает необходимость проведения новых исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая схема стратегирования деятельности авиакомпаний включает анализ функционирования и декомпозицию проблем с последующим агрегированием и ранжированием стратегий развития (рис. 2).

Проводится анализ четырех групп факторов внешней среды деятельности авиакомпании.

Первая группа факторов включает политические факторы, как внешние, включая изменение геополитической ситуации, так и внутренние, направленные на развитие гражданской авиации, примером которых является государственная программа поддержки авиатранспортной отрасли, принятая в 2022 году¹.

Анализ экономических факторов показал, что среди значимых детерминант можно выделить:

1. Изменения цен на топливо, аренду самолетов и др. и соответственно прибыли авиакомпании.

2. Колебания спроса на авиаперевозки со стороны пассажиров.

3. Увеличение налоговой нагрузки на авиакомпанию, в том числе за счет роста акцизов на топливо, что может увеличивать затраты авиаперевозчиков и создавать дополнительное финансовое бремя.

4. Государственные дотации (в частности, благодаря им в 2023 году чистая прибыль авиакомпаний значительно возросла).

Социальные факторы могут влиять как положительно, так и негативно на деятельность авиакомпании:

1. Демографические тенденции могут повлиять на потребность в авиаперевозках и в зависимости от этого создать возможности для новых маршрутов или снижения спроса на имеющиеся.

2. Изменение потребительских привычек и предпочтений авиапассажиров могут привести к снижению спроса на некоторые маршруты или наоборот, к повышению для других.

3. Увеличение доступа к информации и услугам приводит к тому, что авиапассажиры становятся более осведомленными. Это позволяет им легче сравнивать предложения различных авиакомпаний, что в свою очередь, повышает уровень конкуренции: компании вынуждены не только улучшать качество своих товаров и услуг, но и предлагать более гибкие и привлекательные условия, чтобы удерживать пассажиров.

Важными факторами макросреды являются технологические аспекты, которые для

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25 июня 2022 г. № 1693. [Электронный ресурс]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404798711/?ysclid=lzv5ndpc80898790885>. Доступ 27.05.2024.

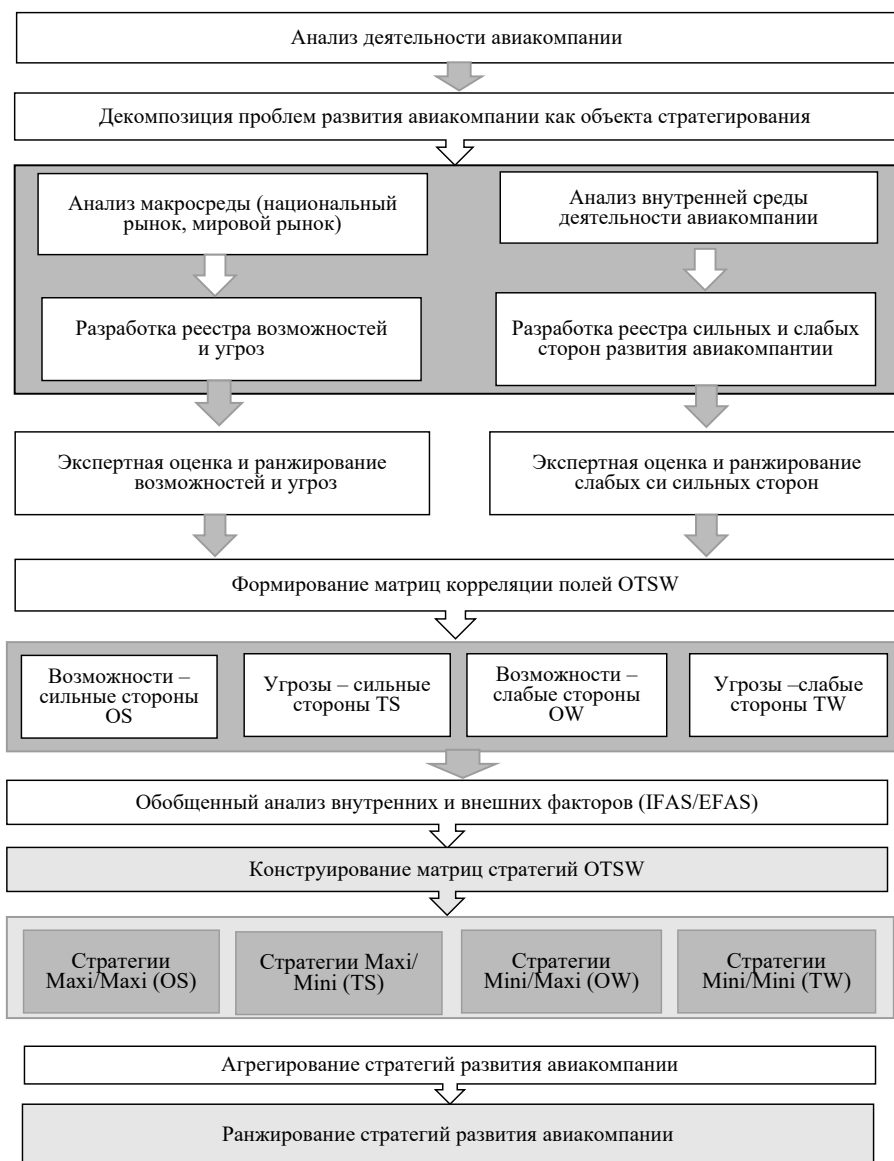


Рис. 2. Алгоритм стратегирования деятельности авиакомпании
[разработано автором по экспериментальным данным и данным из открытых источников].

деятельности авиакомпаний являются положительными:

1. Процессы автоматизации повышают общее качество обслуживания пассажиров, а также обеспечивают минимизацию затрат авиапредприятия.

2. Новые технологии авиации обеспечивают надежность и безопасность полетов, а также уменьшают затраты на операционные расходы.

3. Увеличение производительности оборудования предоставляют авиакомпаниям возможность использовать свои ресурсы более эффективно.

Анализ внешней среды показывает, что авиакомпании находятся в высоко конкурентной среде, где они должны постоянно адаптироваться к новым экономическим, политическим, социальным и технологическим факторам. Для оценки рыночной ситуации проводится анализ угроз (конкурентные силы) путем разбиения их на отдельные составляющие (детерминирующие факторы). Затем, на основе экспертных оценок, определяется значимость каждого элемента декомпозиции с установлением весовых коэффициентов (табл. 1).





Таблица 1

Элементы декомпозиции факторов конкурентной среды авиакомпании

№	Элементы декомпозиции факторов конкурентной среды	Оценки экспертов
1	Степень дифференциации товаров/ услуг авиакомпании	2/3
2	Доля покупок пассажира в объеме продаж авиакомпании	1/3
3	Уровень доходов пассажиров для целевого сегмента	2/3
4	Доля авиауслуг авиакомпании в структуре покупок пассажира	3/3
5	Качество авиауслуг авиакомпании	4/3
6	Доступность информации об авиауслугах и авиаотрасли	2/3
7	Стоимость перенаправления пассажира целевого сегмента на другие авиационные услуги	4/3
8	Барьеры, препятствующие выходу авиакомпании из авиационной отрасли	3/4
9	Степень диверсификации авиабизнеса	4/3
10	Потенциал авиарынка	3/4
11	Стремление авиакомпаний к достижению эффекта «кривой опыта»	2/1
12	Величина капиталовложений для входа авиакомпании на авиарынок	3/4
13	Цены, сдерживающие вход на авиарынок	2/3
14	Активность действий авиакомпаний в ответ на проникновение на авиарынок новых компаний	3/2
15	Уровень государственной поддержки авиакомпаний	4/3
16	Доступность каналов сбыта для новых авиакомпаний	2/2
17	Приверженность к бренду авиакомпании	3/3
18	Количество на рынке аналогов авиауслуг	1/1
19	Степень дифференциации авиауслуг	2/2
20	Значимость для поставщиков объема покупок пассажиров	4/3
21	Координация деятельности авиакомпаний	4/3
22	Уровень соотношения цена/качество для заменителя авиауслуг	2/2
23	Доходность авиауслуг – заменителя авиауслуг	3/2

Источник: разработано автором по экспериментальным данным и открытым данным.

Таблица 2

Определение силы давления факторов на деятельность авиакомпании

j	Причинные факторы	Влияние фактора на результирующую оценку	Вес фактора (W)	Средняя оценка экспертного фактора	Оценка с учетом влияния фактора (X)	W*X
1	Степень дифференциации авиауслуг авиакомпании (низкая – высокая)	–	0,17	2	5–2 = 3	0,56
2	Доля авиапассажира в объеме продаж авиакомпании (малая – большая)	+	0,16	1	1	0,16
3	Доля авиауслуг авиакомпании в структуре покупок пассажира (малая – большая)	–	0,15	3	5–3 = 2	0,30
4	Уровень доходов пассажиров целевого сегмента (низкий – высокий)	+	0,21	3	3	0,63
5	Качество авиауслуг авиакомпании (низкое – высокое)	–	0,19	3	5–3 = 2	0,38
6	Доступ пассажира к информации об авиауслугах и авиаотрасли (ограниченный – свободный)	+	0,11	2	2	0,21
Оценка силы давления на авиакомпанию со стороны авиапассажиров						2,23
1	Потенциал роста авиарынка (малый – большой)	-	0,19	4	5–4 = 1	0,19
2	Величина барьеров выхода авиакомпании из авиаотрасли (низкие – высокие)	+	0,24	4	4	0,95
3	Стоимость переключения авиапассажиров целевого сегмента на другие авиауслуги (низкая – высокая)	–	0,15	3	5–3 = 2	0,33

Таблица 2 (окончание)

Определение силы давления факторов на деятельность авиакомпании

j	Причинные факторы	Влияние фактора на результирующую оценку	Вес фактора (W)	Средняя оценка экспертного фактора	Оценка с учетом влияния фактора (X)	W*X
4	Нацеленность авиакомпаний на эффект «кривой опыта» (слабая – сильная)	+	0,16	4	4	0,64
5	Степень диверсификации деятельности авиакомпании (низкая – высокая)	–	0,24	1	5–1 =4	0,96
Оценка силы давления на авиакомпанию со стороны существующих конкурентов						3,09
1	Ценовые тренды авиаотрасли, сдерживающие вход на рынок (низкие – высокие)	–	0,06	3	5–3 =2	0,12
2	Активность действий авиакомпаний на попытки проникновения новых авиакомпаний на рынок (низкая – высокая)	–	0,10	3	5–3 =2	0,20
3	Уровень капиталовложений для входа авиакомпании в отрасль (низкий – высокий)	–	0,24	3	5–3 =2	0,50
4	Степень приверженности пассажиров целевого сегмента к бренду авиакомпании (низкая – высокая)	–	0,25	3	5–3 =2	0,50
5	Степень доступности каналов сбыта авиаотрасли для новых авиакомпаний (низкая – высокая)	+	0,2	2	2	0,40
6	Степень государственной поддержки авиакомпаний, уже работающих в отрасли (низкая – высокая)	–	0,15	3	5–3 =2	0,32
Оценка силы давления на авиакомпанию со стороны новых конкурентов						2,00
1	Количество взаимозаменяемых услуг на авиарынке (малое – большое)	–	0,25	1	5–1 = 4	1,00
2	Уровень дифференциации авиауслуг авиакомпании (низкая – высокая)	+	0,23	2	2	0,46
3	Значимость для поставщиков объема покупок пассажиров (низкая – высокая)	–	0,3	3	5–3 = 2	0,6
4	Степень координации деятельности авиакомпаний (низкая – высокая)	+	0,21	4	4	0,84
Оценка силы давления на авиакомпанию и конкурентов со стороны поставщиков						2,94
1	Уровень соотношения цена/качество авиауслуг (низкий – высокий)	–	0,7	4	5–4=1	0,70
2	Доходность авиауслуг-заменителя авиауслуг (низкая – высокая)	+	0,3	2	2	0,60
Оценка силы давления на авиакомпанию и конкурентов со стороны появления авиауслуг-заменителей						1,30



Источник: разработано автором по экспериментальным данным и открытым данным.

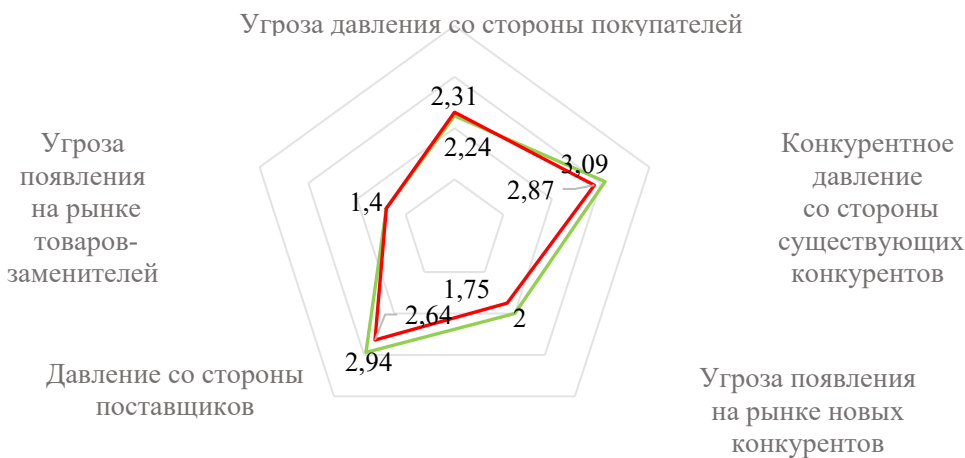


Рис. 3. Лепестковая диаграмма конкурентного бенчмаркинга [разработана автором по экспериментальным, открытым и смоделированным данным].

Таблица 3

Основные возможности и угрозы деятельности авиакомпаний на основе OTSW-анализа

	Возможности		Сильные стороны
O1	Расширение маршрутной сети: компания может расширять свою сеть маршрутов, чтобы привлечь больше пассажиров и увеличить свою долю на рынке.	S1	Широкая сеть маршрутов: авиакомпания осуществляет регулярные рейсы в различные регионы России и за ее пределы, обеспечивая пассажирам широкий выбор направлений.
O2	Внедрение новых технологий: авиакомпания может внедрять новые технологии такие как системы бронирования онлайн, чтобы обеспечить более удобный и быстрый доступ к услугам.	S2	Конкурентные цены: авиакомпания предлагает доступные цены на билеты, включая специальные тарифы.
O3	Улучшение дополнительных услуг: компания может улучшить свои багажные и транспортные услуги для привлечения новых и сохранения существующих пассажиров.	S3	Безопасность пассажиров: в компании активно внедряются меры безопасности и технологические инновации для обеспечения безопасного полета.
O4	Расширение сотрудничества с другими авиакомпаниями для облегчения пересадки пассажиров между рейсами, а также сотрудничества не только с авиакомпаниями, но и с другими бизнесами в разных отраслях для повышения узнаваемости бренда и привлечения новых клиентов		
	Угрозы		Слабые стороны
T1	Конкуренция с другими авиакомпаниями, предлагающими сходные услуги и цены.	W1	Незначительная рыночная доля: авиакомпания занимает небольшую долю на рынке авиаперевозок, поэтому ей сложнее конкурировать с более крупными компаниями.
T2	Сокращение количества путешественников и соответственно уменьшение пассажиропотока.	W2	Отсутствие программы лояльности для пассажиров: По сравнению с лидерами авиакомпания сильно уступает им в этом моменте.
T8	Увеличение топливных расходов: Нестабильность цен на рынке топлива является значительной угрозой для авиакомпаний, так как это значительно влияет на их финансовую устойчивость.	W3	Устаревшие тарифные группы компании: В связи с нестабильным рынком некоторых авиауслуг и сильной конкуренцией со стороны авиакомпаний, авиакомпании следует адаптировать свою политику для усиления своей конкурентоспособности и привлекательности для пассажиров.

Источник: разработано автором по экспериментальным данным.

ЭКСПЕРТНЫЕ ОЦЕНКИ:

- степени значимости *i*-ой сильной стороны для использования *k*-ой возможности;
- степени значимости *i*-ой сильной стороны для противодействия *m*-ой угрозе;
- степени влияния *j*-ой слабой стороны на перспективы использования *k*-ой возможности;
- степени влияния *j*-ой слабой стороны на усугубление возможных последствий реализации *m*-ой угрозы;
- вероятности возникновения *k*-ой возможности;
- степень значимости *k*-ой возможности для развития бизнеса;
- вероятности возникновения *m*-ой угрозы;
- степени тяжести возможных последствий при реализации *m*-ой угрозы.

Рис. 4. Экспертная оценка сочетаний возможностей и угроз сильным и слабым сторонам деятельности авиакомпании.

Таблица 4

OTSW–анализ деятельности авиакомпании с рейтинговыми оценками

		Возможности (O)				Угрозы (T)		
		Расширение маршрутной сети	Внедрение новых технологий	Улучшение дополнительных услуг	Расширение сотрудничества с другими авиакомпаниями	Усиление конкуренции с другими авиакомпаниями	Неустойчивая экономическая ситуация	Увеличение топливных расходов
Сильные стороны (S)	Широкая сеть маршрутов	(5;4;5)	(3;5;4)	(3;2;3)	(5;3;4)	(5;4;5)	(3;4;4)	(2;3;4)
	Конкурентные цены	(4;4;5)	(2;5;4)	(3;2;3)	(4;3;4)	(5;4;5)	(3;4;4)	(4;3;4)
	Безопасность пассажиров	(2;4;5)	(1;5;4)	(1;2;3)	(3;3;4)	(3;4;5)	(2;4;4)	(1;3;4)
Слабые стороны (W)	Незначительная рыночная доля	(4;4;5)	(2;5;4)	(2;2;3)	(4;3;4)	(5;4;5)	(3;4;4)	(2;3;4)
	Отсутствие программы лояльности для пассажиров	(3;4;5)	(4;5;4)	(1;2;3)	(3;3;4)	(4;4;5)	(1;4;4)	(1;3;4)
	Устаревшие тарифные группы компании	(5;4;5)	(2;5;4)	(3;2;3)	(2;3;4)	(5;4;5)	(1;4;4)	(4;3;4)



Источник: разработано автором по экспериментальным, открытым и смоделированным данным.

Матрица факторов OTSW

	Сильные стороны (S)	Слабые стороны (W)
Возможности (O)	Стратегии Maxi/Maxi	Стратегии Mini/Maxi
Угрозы (T)	Стратегии Maxi/ Mini	Стратегии Mini/Mini

Результирующая оценка Y_i экспертных мнений ранжирования i -угроз определяется по выражению:

$$Y_i = \sum W_{ij} \cdot X_{ij}, \tag{1}$$

где W_{ij} – весовые коэффициенты j -х элементов декомпозиции i -х угроз;

X_{ij} – оценки j -х элементов декомпозиции i -х угроз.

Далее проводится количественная оценка угроз для анализируемой авиакомпания и ее прямых конкурентов. В табл. 2 приведен пример такой количественной оценки применительно к смоделированным для этого условиям.

Результаты оценок конкурентных сил в такой смоделированной ситуации представлены на диаграмме (рис. 3).

OTSW-анализ представляет собой метод стратегического планирования, который является модификацией SWOT-анализа и включает анализ факторов внутренней и внешней среды. Данный анализ строится на разработке OTSW-матрицы (табл. 3), которая позволяет сопоставить внешние возможности и угрозы с внутренними сильными и слабыми сторонами, которые прошли отбор на основе результирующих оценок экспертов.

На следующем этапе проводится анализ соответствия возможностей и угроз сильным и слабым сторонам деятельности авиакомпании (рис. 4).

Результаты OTSW-анализа условного, смоделированного примера рейтинговой оценки отдельно взятой авиакомпании представлены в табл. 4.

На основе полученной OTSW-матрицы факторов можно сформировать четыре известных группы альтернативных стратегий с приоритетами на стратегии Maxi/Maxi, которые формируются в результате комбинации возможностей и сильных сторон (табл. 5).

Следовательно, по результатам проведенного анализа можно сделать вывод, что у авиакомпании, условия деятельности кото-

рой смоделированы в ходе эксперимента, имеется достаточное количество как возможностей, так и потенциальных угроз, вызванных множеством экономических, политических, социальных и технологических факторов. Предпочтительным в рассматриваемом примере является вариант стратегического проектирования развития компании, нацеленный на реализацию имеющихся возможностей и накопленного потенциала (Maxi/Maxi), который предполагает разработку, внедрение и осуществление ряда стратегических направлений. Среди них основная возможность связана с расширением маршрутной сети авиакомпании. Развитие маршрутной сети укрепит позиции компании на рынке авиаперевозок и обеспечит приток пассажиропотока. Однако реализацию данной возможности ставит под угрозу слабая сторона компании – усиление внутренней конкуренции, которая может сильно отразиться на ее деятельности. С другой стороны, противостоять данной угрозе помогут такие сильные стороны, как широкая сеть маршрутов и конкурентные цены, благодаря которым авиакомпания может соперничать с другими авиакомпаниями на маршрутах и поддерживать спрос на авиаперевозки. Пассажиры будут продолжать выбирать бренд авиакомпании из-за рыночных цен на билеты и возможности выбора куда полететь. Еще одним важным направлением стратегии Maxi/Maxi является разработка и реализация программы снижения издержек. В целом, чтобы в полной мере воспользоваться возможностями и противостоять угрозам авиакомпании стоит сконцентрировать свои усилия на решении выявляемых при проведении описанного выше анализа проблем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стратегическое планирование позволяет авиакомпаниям предвидеть возможные риски и возможности, а также разрабатывать гибкие и адаптивные подходы к управлению бизнесом.

В условиях неопределенности, таких как пандемии, изменения климата и конфликты, авиакомпании вынуждены быстро адаптироваться и внедрять инновации. Это может включать в себя внедрение новых технологий, улучшение сервиса для пассажиров, а также поиск новых рынков и партнерств. Стратегическое мышление и проактивность становятся ключевыми факторами успеха, позволяя авиакомпаниям не только выживать, но и развиваться в условиях постоянных изменений. Для разработки эффективной стратегии развития авиакомпании необходимо провести глубокий анализ внутренних и внешних факторов, влияющих на бизнес. Внутренние факторы включают в себя структуру компании, ее финансовое состояние, технологические возможности и человеческие ресурсы. В то же время внешние факторы, такие как изменения в законодательстве, колебания цен на топливо, спрос на авиаперевозки и конкурентная среда, также играют важную роль.

Таким образом, подход, основанный на стратегировании деятельности авиакомпаний на базе обобщенного анализа внутренних и внешних факторов (IFAS/EFAS), OTSW-анализа, позволяет выявлять новые угрозы и учитывать в основной стратегии развития авиакомпании (Maxi/Maxi) эффективное использование имеющихся возможностей и накопленного потенциала.

Практическая значимость исследования возможности внедрения OTSW-анализа в стратегирование деятельности авиакомпаний обусловлена актуальностью задач развития гражданской авиации в рамках достижения национальных целей развития, реализации национальных проектов, связанных с формированием эффективной транспортной системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Донцова О. И., Волохов А. В., Морковкин Д. Е. Перспективы развития мировой авиации (на примере

«Аэрофлота» и «Lufthansa») // Экономические отношения. – 2020. – Т. 10. – № 2. – С. 363–380. DOI: 10.18334/eo.10.2.110109.

2. Кахриманова Д. Г., Соколов М. А. Основные тенденции развития авиатранспортной отрасли в условиях санкций // Экономика и предпринимательство. – 2022. – № 8 (145). – С. 227–230. DOI 10.34925/EIP.2022.145.8.043.

3. Брутян М. М. Перспективы развития рынка гражданской авиации Индии // РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2018. – № 1. – С. 62–68. EDN: YWWPRZ.

4. Бережной А. В. Оценка конкурентоспособности морского порта региона: методология и практика реализации // Экономика. Управление. Право. – 2014. – № 3 (51). – С. 37–42. EDN: TKQBRR.

5. Голубинский В. В. Особенности формирования стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации // Экономика и социум. – 2020. – № 1 (68). – С. 1078–1080. EDN: TFZQOR [Ограниченный доступ].

6. Козин Е. Г., Спиркин А. В., Субботин Ю. А. Практическое применение методологии стратегирования в разработке стратегии Петербургского метрополитена // Стратегирование: теория и практика. – 2022. – Т. 2. – № 2 (4). – С. 163–173. DOI 10.21603/2782-2435-2022-2-2-163-173.

7. Матвеева Л. Г. Макроэкономические и региональные детерминанты стратегирования развития водного хозяйства // Вестник Академии знаний. – 2023. – № 4 (57). – С. 184–187. EDN: BJWCDZ.

8. Королев А. В. Подходы к разработке стратегии эффективного функционирования и развития пассажирского транспорта в условиях интеграционных преобразований // Экономика, моделирование, прогнозирование. – 2015. – № 9. – С. 65–71. EDN: NSGPOB.

9. Нестеров Ю. В., Фрайман А. Б. Парадигма стратегии управления воздушным транспортом // Транспорт Российской Федерации. – 2014. – № 2 (51). – С. 24–29. EDN: SDEJAP.

10. Квинт В. Л. Разработка стратегии: мониторинг и прогнозирование внутренней и внешней среды // Управленческое консультирование. – 2015. – № 7 (79). – С. 6–11. EDN: UBHJLL.

11. Kvint, V. L. Konzepte der Strategie: Impulse für Führungskräfte. München. UVK Verlag, 2021, 128 p. ISBN 978-3-7398-3105-3.

12. Kvint, V. L. Strategy for the Global Market: Theory and Practical applications. New York. Routledge Taylor and Francis Group, 2016, 548 p. ISBN: 9781138892125.

13. Kvint, V. L., Bodrunov S. D. Strategizing Societal Transformation. Knowledge, Technologies, and Noonomy. USA (Palm Bay), Canada (Burlington), United Kingdom (Abingdon). Apple Academic Press, 2023, 228 p. ISBN 978-1-77491-422-9.

14. Захарова И. В. Анализ факторов развития регионального авиационного кластера // Вестник Московского авиационного института. – 2017. – Т. 24. – № 1. – С. 192–200. EDN: YGSCBX.

15. Раменская С. Е., Фисун Ю. В. Выбор стратегии развития авиационной компании // Вестник Белорусского государственного экономического университета. – 2018. – № 1 (126). – С. 122–130. EDN: YPJEEI. ●

Информация об авторе:

Сушко Ольга Петровна – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики и управления на воздушном транспорте Московского государственного технического университета гражданской авиации; доцент кафедры национальной и региональной экономики Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова, Москва, Россия, osushko@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 24.01.2024, одобрена после рецензирования 06.08.2024, принята к публикации 10.09.2024.





Моделирование оценки потенциала изменения тарифов на авиаперевозки на основе составляющих себестоимости



Илья УРЮПИН



Андрей ВЛАСЕНКО

Илья Вадимович Урюпин¹,
Андрей Олегович Власенко²

¹ Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление» Российской академии
наук, Москва, Россия.

² ООО «Межотраслевой аналитический центр»,
Москва, Россия.

¹ ORCID: 0000-0001-7258-754X; Web of Science
Researcher ID: AIB-5096-2022; Scopus Author ID:
57210445072; РИНЦ SPIN-код: 9065-8749; РИНЦ
Author ID: 1137480.

² ORCID: 0000-0002-1286-8857; РИНЦ SPIN-код:
8362-4584; РИНЦ Author ID: 893078.

✉ ¹ uryupin93@yandex.ru.

АННОТАЦИЯ

Стоимость перевозки (тариф) является одним из ключевых факторов развития авиатранспортной системы (АТС) любой страны, в частности Российской Федерации. В свою очередь, формирование тарифа напрямую зависит от себестоимости перевозки и ее составляющих. Прогнозирование и моделирование себестоимости с учетом влияния внешних факторов позволяет получить оценку потенциала изменения тарифа, которая может быть использована в качестве индикатора направления развития АТС и корректировки повышения ее эффективности.

Цель исследования заключается в разработке модели оценки потенциала изменения тарифов на авиаперевозки в Российской Федерации, в перспективе 2030–2040 годов для парка магистральных самолетов иностранного производства. Оценка потенциала изменения тарифа строится на основе изменения наиболее значимых внешних составляющих

себестоимости перевозки, таких как стоимость топлива, уровень годового налета, стоимость технического обслуживания и ремонта. Выбор составляющих обусловлен наибольшим влиянием на них долгосрочных факторов.

С помощью математического моделирования и применения экономико-математических методов, на основе статистических и прогнозных данных, модель апробирована для определения оценки потенциального изменения величины и структуры прямых эксплуатационных расходов магистральных самолетов по укрупненным статьям расходов. С использованием сценарных допущений определены интервалы варьирования факторов, влияющих на себестоимость. Результат моделирования потенциала изменения себестоимости и тарифов демонстрируется для двух групп магистральных коммерческих самолетов: узкофюзеляжных и широкофюзеляжных.

Ключевые слова: авиаперевозки, себестоимость, тариф, эксплуатационные расходы, математическое моделирование.

Для цитирования: Урюпин И. В., Власенко А. О. Моделирование оценки потенциала изменения тарифов на авиаперевозки на основе составляющих себестоимости // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 94–103. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-12>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Стоимость (тариф) является ключевым фактором, влияющим на спрос на авиаперевозки. В то же время тариф напрямую связан с себестоимостью авиаперевозки, то есть зависит от прямых и косвенных затрат, необходимых для выполнения полетов и работы компании. К основным статьям расходов, формирующим себестоимость авиабилета, относятся обслуживание пассажиров, багажа и воздушных судов в аэропорту, затраты на авиационное топливо, на ремонт и техническое обслуживание (ТОиР) воздушных судов, страхование и лизинг, фонд оплаты труда, затраты на рекламу и административные расходы, комиссии и сборы, аэронавигационное и метеообеспечение, амортизацию воздушного судна [1–4].

Вместе с тем на стоимость авиабилетов также оказывают влияние уровень конкуренции и изменение платежеспособного спроса населения. Так, на линиях с большим количеством перевозчиков авиабилеты зачастую могут продаваться ниже себестоимости ради удержания позиций компании на рынке. Также существенное влияние на стоимость авиабилета оказывает и коммерческая политика компании. При этом значительное воздействие оказывают периоды выполнения полетов (сезонность) [5], в которые авиакомпании формируют расписание и устанавливают разные уровни тарифов. Вместе с этим авиакомпании часто применяют принцип ценовой дискриминации пассажиров [6], заключающийся в том, что потребители могут платить разную цену за одну и ту же авиаперевозку. Это связано с тем, что, как правило, у авиакомпаний по каждому направлению существует много тарифов, отличающихся условиями и правилами бронирования. К основным «ограничениям» относятся [7]: раннее бронирование (минимальное время до вылета в сутках), проведение в пункте назначения субботнего вечера, начисление миль (бонусов) часто летающим пассажирам, возможность возврата/обмена билета, расписание авиакомпании.

На цену билета также может влиять принадлежность потребителя к определенной социальной группе. Например, тарифы для молодежи, детей, студентов, пенсионеров. Часть из этих социальных групп попа-

дает в программы субсидирования авиаперевозок¹.

Однако, необходимо отметить, что большинство из представленных выше факторов являются элементами оперативного управления авиакомпанией (оперативного управления доходами) [8; 9] и практически не связаны с эксплуатируемой техникой. Поэтому единственным фактором, оказывающим существенное влияние на уровень тарифа в долгосрочной перспективе и связанным с техникой, является себестоимость авиаперевозки. Именно ее изменение в наибольшей степени определяет потенциальный объем авиаперевозок [3; 10], выручку и прибыль компании.

В настоящее время можно выделить ряд проблем в области эксплуатации и технического обслуживания воздушной техники [11], что в свою очередь может потенциально оказать существенное влияние на структуру и величину эксплуатационных расходов и, как следствие, повлечь рост уровня тарифов на авиаперевозки. Таким образом, *задача* определения потенциала изменения тарифа является актуальной для планирования стратегии авиакомпаний и прогнозирования спроса на авиаперевозки и развития авиатранспортной системы (АТС) в целом.

Для определения потенциального изменения тарифов на авиаперевозки в работе, с помощью *математического моделирования* [1; 12–14] и использования *статистических и прогнозных входных данных*, имевшихся на момент исследования в открытых источниках, создана модель оценки изменения величины и структуры прямых эксплуатационных расходов (ПЭР) воздушных судов, включающая следующие укрупненные статьи: авиаГСМ, ТОиР, оплата труда летного и cabinного экипажей, аэропортовые расходы, владение. Среди наиболее значимых внешних условий, влияющих на оценку себестоимости перевозки под воздействием долгосрочных факторов, выделены три: стоимость топлива, ТОиР и уровень годового налета.

Для выделенных факторов проведен сценарный анализ изменения и чувствительности структуры и суммарного значения себестоимости авиаперевозки. В порядке апробации использования модели для каждого из факторов

¹ Постановление Правительства РФ от 02.03.2018 № 215. [Электронный ресурс]: <http://static.government.ru/media/files/oY69DJH21BsDYTYg9wGksgA7AbEN8AVi.pdf>. Доступ 29.01.2024.



рассматривались сценарные интервалы варьирования. На основе полученных в ходе апробации результатов изменения себестоимости и ее составляющих рассмотрены сценарные интервалы изменения тарифа в перспективе 2030–2040 гг. Результат оценок потенциала изменения тарифов представлен для магистральных самолетов зарубежного производства.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение интервалов варьирования факторов, влияющих на себестоимость

Стоимость и тип топлива являются ключевыми условиями для определения требований к топливной эффективности перспективных двигателей. Поскольку стоимость авиационного топлива в ретроспективный период сильно коррелировала со стоимостью нефти², можно ожидать, что средняя стоимость топлива на период 2030–2040 гг. существенно поменяется под влиянием изменения стоимости нефти. При этом дополнительное воздействие будут оказывать расширение использования синтетического авиатоплива и введения различного вида платежей за дополнительные выбросы углерода в атмосферу – так называемого «углеродного налога» [15–17].

Для оценки стоимости авиационного керосина в качестве прогнозных значений стоимости нефти в 2030–2040 годах использованы значения 85–105 долл. США за баррель, присутствующие также в качестве допущений в прогнозе FAA³ и EU⁴. При такой цене нефти стоимость авиационного керосина составит от 730 до 930 долл. за тонну.

С общим ужесточением экологических требований в период 2030–2050 годов традиционные и гибридные силовые установки в значительной степени могут перейти на использование био- или синтетического топлива – SAF (Sustainable Aviation Fuel) Переход к использованию SAF может существенно увеличить фактическую стоимость топлива

относительно прогнозной стоимости нефти. С учетом прогнозируемого международным энергетическим агентством⁵ увеличения доли такого топлива в общем объеме авиационного топлива с 10 % в 2030 году до 19 % в 2040 году, фактическая стоимость авиационного топлива может составить от 864 долл. США за тонну до 1020 долл. США за тонну.

Дополнительное увеличение стоимости ископаемого топлива в будущем также может быть следствием распространения практики введения углеродного налога. В качестве допущения при расчете увеличения стоимости авиационного керосина значение углеродного сбора может быть принято за 50 долл. США за тонну CO₂е в 2030 году и 200 долл. США за тонну CO₂е в 2040 году⁶, что в перерасчете на тонну сжигаемого авиационного керосина будет соответствовать стоимости от 157 до 630 долл. США за тонну. В этом случае, стоимость смеси из ископаемого и искусственного топлива в 2035 году составит 1100–1500 долл. США за тонну.

В России в настоящее время перспективы введения углеродного налога и производства биотоплива пока не ясны. В то же время полный отказ от ископаемого топлива представляется маловероятным. Средняя стоимость топлива в России в целом отражает динамику мировых цен, но в меньшей степени подвержена колебаниям. Наиболее реалистичным коридором значений средней стоимости авиационного топлива для условий Российской Федерации для традиционных двигателей в 2030–2040 годы представляется диапазон от 730 долл. США до 1100 долл. США за тонну. Поскольку цена авиатоплива на мировом рынке в последнее время демонстрирует высокую волатильность, дополнительно было рассмотрено значение 1500 долл. США за тонну. Базовое значение стоимости авиатоплива принято на уровне 850 долл. США за тонну⁷ (в ценах 2021 года).

² Jet Fuel Price Monitor. [Электронный ресурс]: <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>. Доступ 29.01.2024.

³ FAA Aerospace Forecast Fiscal Years 2023–2043. [Электронный ресурс]: <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2023-FAA%20Aerospace%20Forecasts.pdf>. Доступ 29.01.2024.

⁴ Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. [Электронный ресурс]: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/55fe3eb1-cc8a-11ea-adf7-01aa75ed71a1> Доступ 29.01.2024.

⁵ Aviation fuel consumption in the Sustainable Development Scenario, 2025–2040. [Электронный ресурс]: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/aviation-fuel-consumption-in-the-sustainable-development-scenario-2025-2040> Доступ 29.01.2024.

⁶ Hydrogen Insight 2021. [Электронный ресурс]: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf> Доступ 29.01.2024.

⁷ Федеральное агентство воздушного транспорта. [Электронный ресурс]: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-ceny-na-aviagsm/> Доступ 05.03.2022.

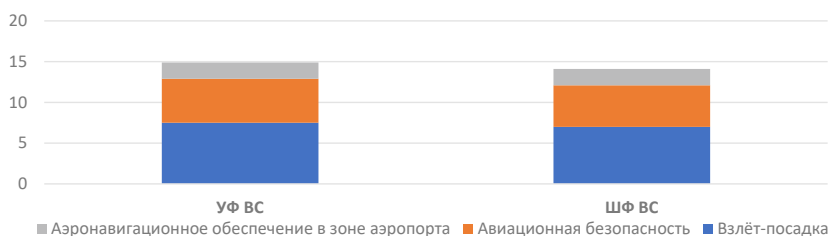


Рис. 1. Аэропортовые расходы [выполнено авторами].

Затраты на ТОиР являются важной составляющей себестоимости. Поскольку в большинстве рассматриваемых в исследовании современных воздушных судов (ВС) в России используется большое количество комплектующих и технологий иностранного производства, в числе исходных предпосылок при формировании сценариев принято увеличение расходов по данной статье, в том числе за счет курсовых изменений стоимости, усложнения и удорожания логистики доставки запчастей. Так как точное сбалансированное значение относительного изменения затрат на ТОиР в настоящее время предсказать невозможно, в качестве сценарных допущений для модельных расчетов коэффициенты удорожания ТОиР на летный час были приняты равными 1 (без удорожания), 1,3 (незначительное удорожание) и 1,7 (сильное удорожание).

Уровень годового налета тесно связан с возможностью проведения ТОиР и оказывает прямое влияние на объем выполняемой работы в год. Снижение данного показателя приводит к пропорциональному снижению годового объема работы и, соответственно, такому же росту удельной стоимости владения воздушным судном.

При проведении модельных расчетов уровень годового налета, относительно характерного для групп ВС, для трех гипотетических сценариев был принят на уровне 1 (сохранение налета), 0,85 (незначительное снижение налета), 0,7 (сильное снижение налета).

Расходы на оплату труда летного и cabinного экипажей для проведения расчетов были зафиксированы на характерных для классов ВС текущих уровнях.

Аэропортовые расходы были оценены для классов ВС путем получения средневзвешенных значений аэропортовых сборов на основе объема работы классов по аэропортам авиатранспортной системы Российской Федерации (рис 1). В расчете на тонну максимальной

взлетной массы (МВМ) они были приняты на уровне около 15 долл. США для узкофюзеляжных (УФ) ВС и около 14 долл. США для широкофюзеляжных (ШФ) ВС.

На основе данных о летно-технических характеристиках (ЛТХ) были оценены уровни прямых эксплуатационных расходов для современных ВС зарубежного производства, по которым имеются данные об их техническом облике.

Так как компоновки и характер применения самолетов от компании к компании могут сильно отличаться, для сравнимости результатов оценки уровня удельных расходов были приняты следующие допущения: (1) для всех воздушных судов в рамках одного класса техники было принято одинаковое значение среднего налета, соответствующее классу техники; (2) для всех воздушных судов принимались расчетные одноклассные компоновки салона с одинаковым шагом кресел.

Сценарные оценки расходов сгруппированы по двум рассматриваемым классам коммерческих магистральных самолетов: узкофюзеляжные самолеты, широкофюзеляжные самолеты.

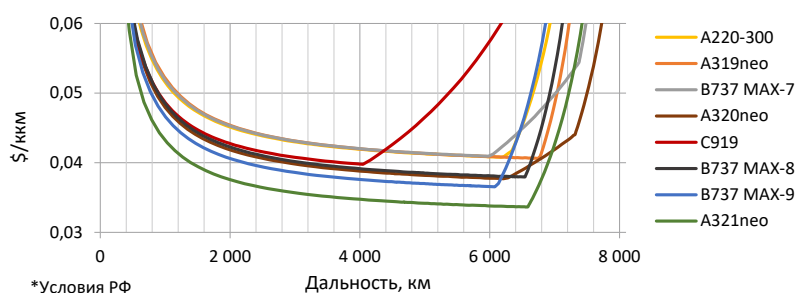
С целью определения потенциала изменения себестоимости перевозки расчеты проведены исходя из базовых сценарных значений отсчета интервалов изменения трех рассматриваемых факторов: (1) стоимость топлива – 850 долл. США; (2) – удорожание стоимости ТОиР – 0 %; (3) снижение уровня налета – 0 %. Поскольку эти факторы обособленно влияют на не зависящие друг от друга статьи расходов, их влияние можно рассматривать по отдельности.

Для определения себестоимости, на основе открытых данных^{8,9} о перевозках пассажиров и грузов, определены средние дальности

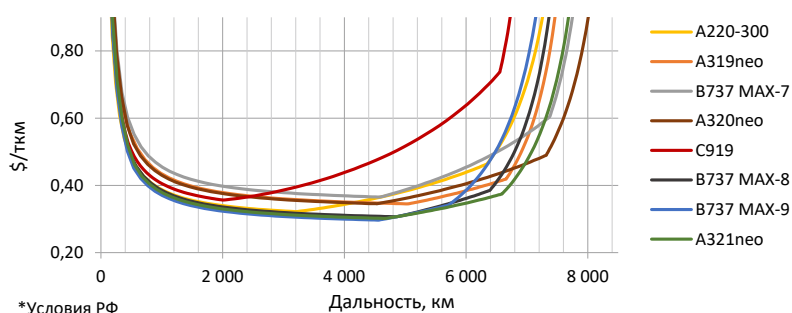
⁸ FlightRadar24 [Электронный ресурс] <https://www.flightradar24.com/>. Доступ 29.01.2024.

⁹ Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс] <https://fedstat.ru/>. Доступ 29.01.2024.





а) в расчете на кресло-километр



б) в расчете на тонно-километр

Рис. 2. Удельные прямые эксплуатационные расходы УФ ВС в расчете на а) кресло-километр и б) тонно-километр [рассчитаны авторами].

перевозки для рассматриваемых классов авиатехники.

Оценка прямых эксплуатационных расходов магистральных ВС

Оценка прямых эксплуатационных расходов (ПЭР) получена с помощью математического моделирования и экономико-математических методов, на основе имеющихся статистических данных и зависимостей [1; 14]. Данные расчеты в значительной мере носят условный характер, не связаны с эксплуатационными показателями отдельных компаний, не учитывают изменений, произошедших в период после подготовки материалов исследования, и используются исключительно для апробации предлагаемой расчетной модели в рамках заданных сценариев.

Магистральные узкофюзеляжные самолеты

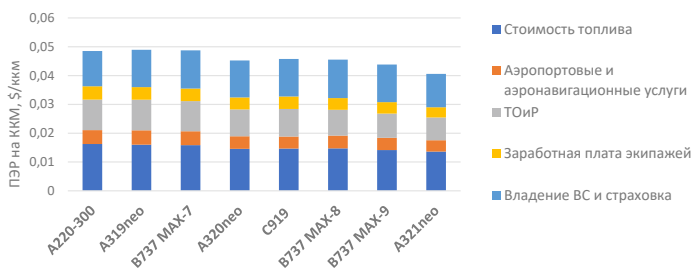
На рис. 2 представлены диаграммы удельных ПЭР УФ ВС в расчете на кресло-километр и на тонно-километр в зависимости от дальности полета. Оптимальные удельные расходы при пассажирских перевозках достигаются на дальностях 1900–7000 км и составляют в зависимости от ВС от 3,5 до 4,5 центов

США за ккм. Диапазоны оптимальных дальностей при грузовых перевозках смещены влево и находятся в диапазоне 1000–6500 км. Стоимость перевозки в зависимости от модели воздушного судна составляет 0,3–0,4 долл. США за ткм.

Удельные прямые расходы на средних дальностях (рис. 3) составляют для пассажирских перевозок в среднем около 4,6 центов США на ккм, а для грузовых – 34,3 центов США на ткм.

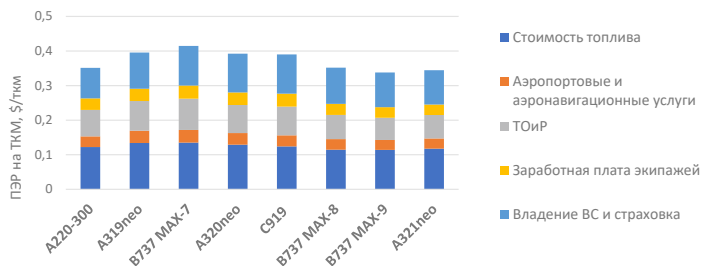
Магистральные широкофюзеляжные самолеты

На рис. 4 представлены удельные ПЭР ШФ ВС в расчете на кресло-километр и на тонно-километр в зависимости от дальности полета. Оптимальные удельные расходы при пассажирских перевозках достигаются на дальностях 4000–14000 км и составляют в зависимости от ВС от 3,1 до 4 центов США за ккм. Диапазоны оптимальных дальностей при грузовых перевозках смещены влево и находятся в диапазоне 2000–13000 км. ШФ ВС обладают минимальной стоимостью перевозки тонно-километра, которая в зависимости от модели ВС составляет 22–30 центов США за ткм.



*Условия РФ

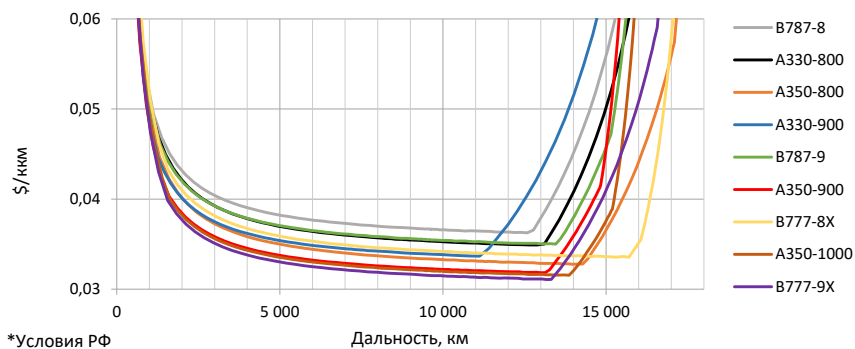
а) в расчете на кресло-километр



*Условия РФ

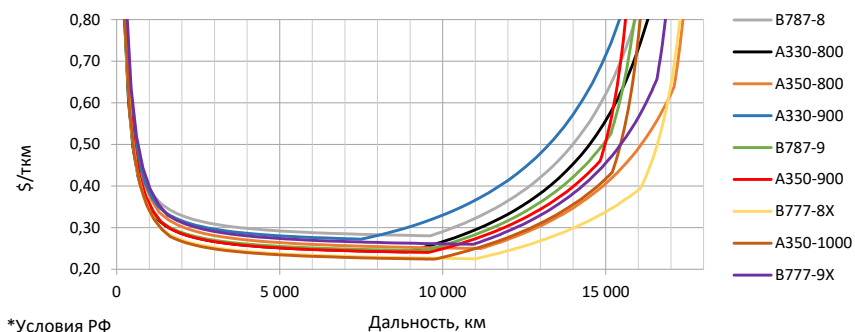
б) в расчете на тонно-километр

Рис. 3. Распределение удельных прямых эксплуатационных расходов по статьям расходов УФ ВС в расчете на а) кресло-километр, б) тонно-километр [рассчитаны авторами].



*Условия РФ

а) в расчете на кресло-километр



*Условия РФ

б) в расчете на тонно-километр

Рис. 4. Удельные прямые эксплуатационные расходы ШФ ВС в расчете на а) кресло-километр и б) тонно-километр [рассчитаны авторами].



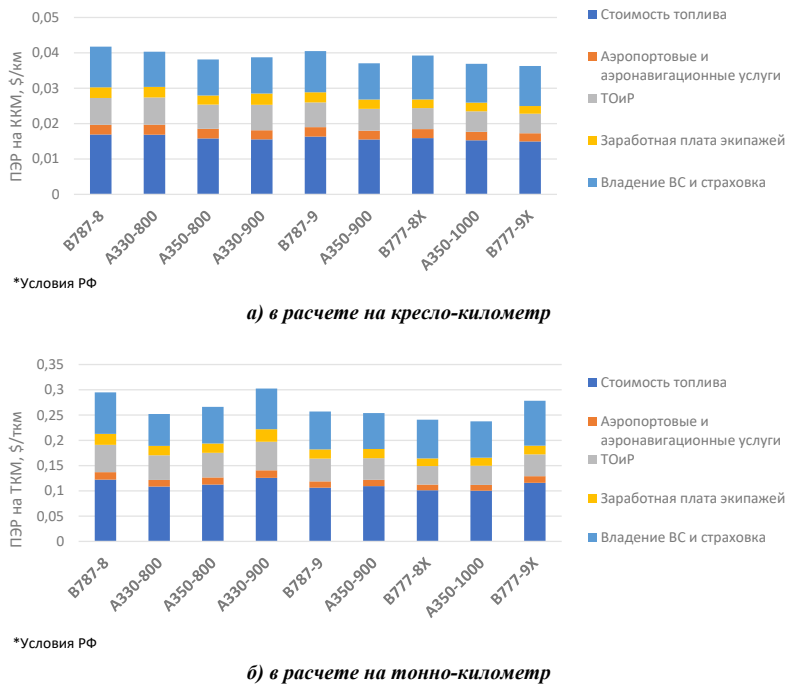


Рис. 5. Распределение удельных прямых эксплуатационных расходов ШФ ВС по статьям расходов в расчете на а) кресло-километр, б) тонно-километр [рассчитаны авторами].

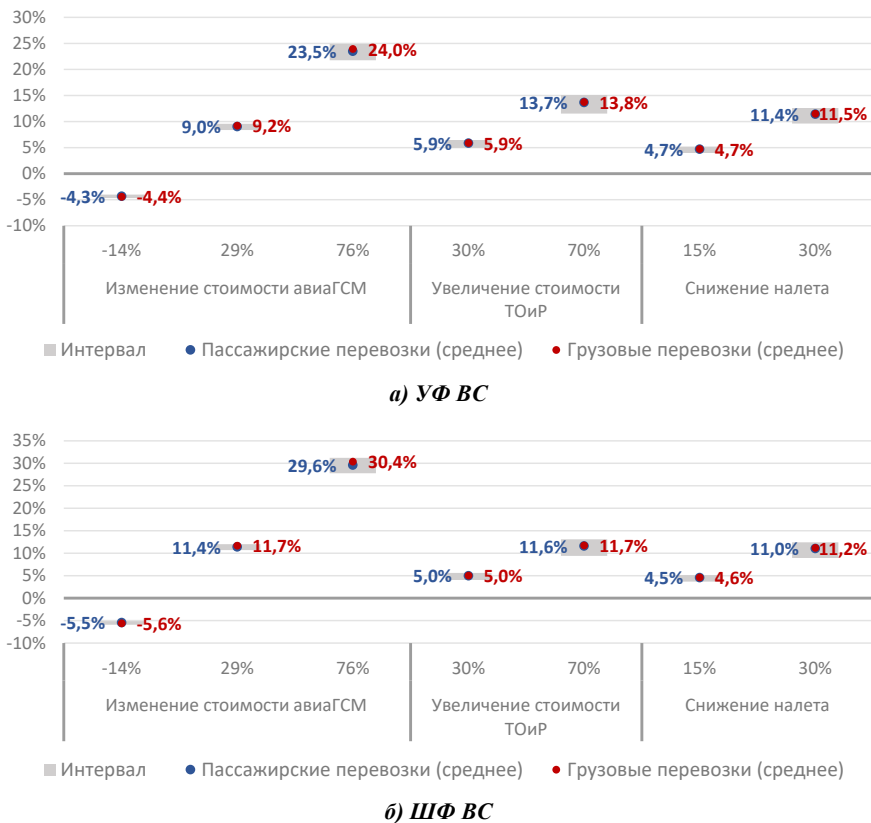


Рис. 6. Изменение прямых эксплуатационных расходов при варьировании факторов [выполнено авторами].

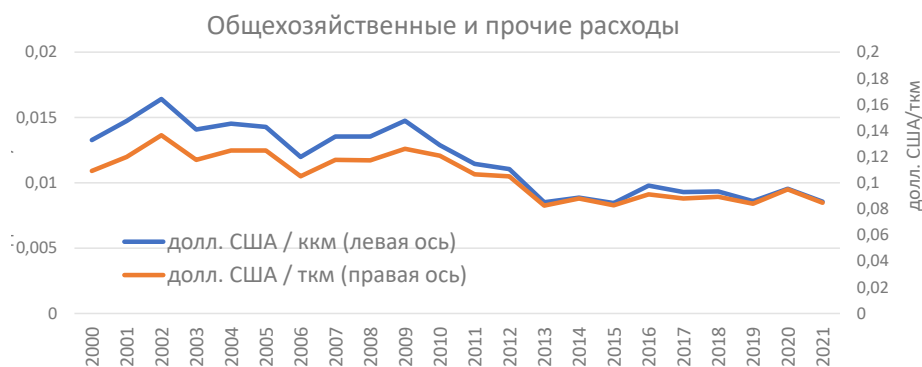


Рис. 7. Динамика удельных расходов, не входящих в ПЭР [выполнено авторами].

Удельные прямые расходы на средних дальностях (рис. 5) составляют для пассажирских перевозок в среднем около 3,9 цента США за ккм, для грузовых – 26,2 цента США за ткм.

Варьирование факторов себестоимости

Исходя из полученной для каждого класса ВС структуры расходов оценено изменение суммарной себестоимости при варьировании в предложенных выше диапазонах трех факторов относительно базового значения. В качестве сценарных примеров для построения модели были взяты значения:

- Стоимость топлива 730, 1100 и 1500 долл. США за тонну (–14 %, +29 % и +76 % относительно базового значения и в условиях высокой волатильности);
- Увеличение стоимости ТОиР на 30 % и 70 %;
- Снижение налога на 15 % и 30 %.

На рис. 6 представлены результаты моделирования изменения прямых эксплуатационных расходов пассажирских и грузовых перевозок в зависимости от изменения факторов для УФ ВС и ШФ ВС. Из полученных результатов видно, что значения среднего изменения тарифа при заданном изменении фактора для грузовых и пассажирских перевозок очень близки. При этом с ростом средней дальности применения ВС наблюдается увеличение влияния топливной составляющей на уровень расходов.

Оценка изменения тарифа

Если исходить из достаточно низкого уровня операционной рентабельности пассажирских авиаперевозок (например, операционная рентабельность пассажирских авиаперевозок в России, по данным ООО «Национальные кредитные рейтинги» оценивалась

в тот период в 1–4 %¹⁰), говорить о наличии ускоренного роста тарифа по сравнению с себестоимостью не приходится. При допущении, что уровень рентабельности будет находиться около нуля, изменение тарифа будет происходить синхронно с изменением полной себестоимости.

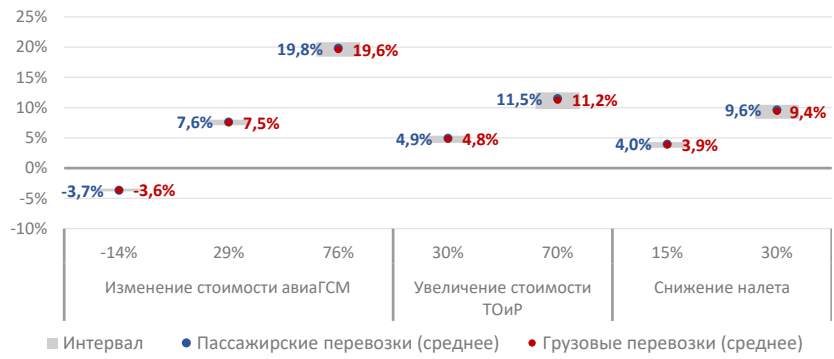
Для перехода от прямых эксплуатационных расходов к полной себестоимости необходимо учесть прочие расходы, не входящие в ПЭР. Проведенный авторами анализ структуры и динамики расходов показывает, что их значение как для пассажирских, так и для грузовых перевозок в постоянных ценах с 2013 г. меняется очень слабо и оценивается в порядка 0,9 цента США за ккм и около 8,7 цента США за ткм (рис. 7).

С учетом добавки, не учтенной в ПЭР, определено относительное изменение тарифа (рис. 8). Наибольший рост тарифа для УФ ВС и ШФ ВС будет при экстремально высоких ценах на топливо. При этом ШФ ВС демонстрируют больший рост тарифа при удорожании топлива.

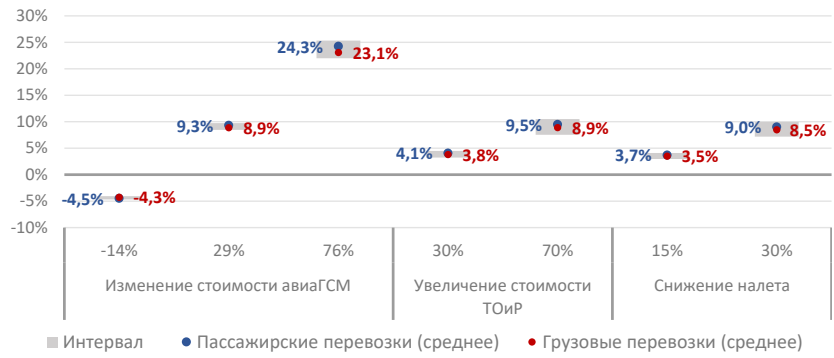
Анализ чувствительности тарифа к влияющим на себестоимость факторам показал, что эластичность тарифа относительно увеличения стоимости авиатоплива составляет от 0,26 (УФ ВС) до 0,31 (ШФ ВС), относительно удорожания ТОиР от 0,13 (ШФ ВС) до 0,16 (УФ ВС), относительно снижения налога от 0,27 (ШФ ВС) до 0,29 (УФ ВС). В целом можно отметить, что с увеличением средней дальности перевозки роль топливной составляющей растет. Наибольшая чувствительность тарифа на

¹⁰ Баймухаметова Л. Транспорт: где зарыта маржа? НКР, 6.12.2021, С. 10. [Электронный ресурс]: https://ratings.ru/files/research/corps/Transport_margin_Dec2021.pdf. Доступ 29.01.2024.





а) УФ ВС



б) ШФ ВС

Рис. 8. Изменение тарифа в зависимости от факторов, оказывающих влияния на изменение себестоимости (выполнено авторами).

перевозки для УФ ВС наблюдается к снижению налета, для ШФ ВС – к стоимости топлива.

Моделирование показывает (рис. 9), что при сочетании высоких значений сценарных факторов (сценарий 1: стоимость топлива 1100 долл. США за тонну, удорожание ТОиР на 70 % и снижение налета на 30 %) рост тарифа для УФ ВС составит около 30 %, для ШФ ВС – 29 %.

В случае, если на топливо установятся экстремальные цены (1500 долл. США за

тонну) при 70 % удорожании ТОиР и 30 % снижении налета (сценарий 2), увеличение тарифа составит для УФ ВС – 43 %, для ШФ ВС – 45 %.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

В работе, на основе оценки приращений составляющих себестоимости перевозки представлена модель и на основе предложенных сценариев рассчитана усредненная величина и структура прямых эксплуатационных расходов перевозки пассажиров

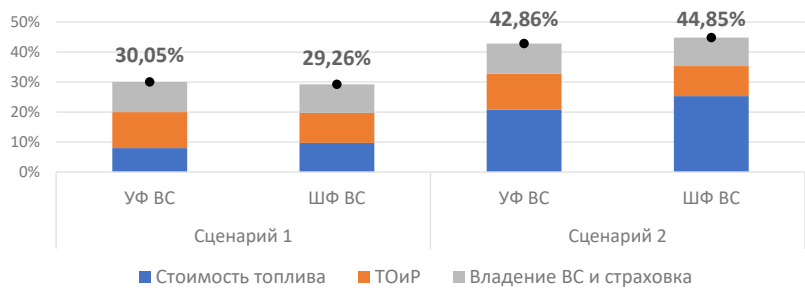


Рис. 9. Структура увеличения тарифа на перевозки в двух сценариях модели [выполнено авторами].

и грузов в авиатранспортной системе РФ, соответствующая средней взвешенной дальности полета узко- и широкофюзеляжных магистральных самолетов. При сценарном допущении об увеличении стоимости топлива с 850 до 1100 долл./т, стоимости ТОиР на 70 % и снижении налета до 30 % от базового уровня получено, что рост прямых эксплуатационных расходов составит около 36 %, причем для УФ ВС вклад авиаГСМ – 10 %, ТОиР – 14 %, налета – 12 %, а для ШФ ВС вклад авиаГСМ – 12 %, ТОиР – 12 %, налета – 12 %.

С учетом найденных оценок факторов изменения себестоимости перевозки и при условии околонулевых значений рентабельности авиаперевозок в авиатранспортной системе Российской Федерации, по результатам расчетов получены оценки изменения тарифа на перевозки.

Апробированная в ходе исследования модель и полученные подходы к оценке изменения тарифа на авиаперевозки могут быть использованы в дальнейшем при прогнозировании потенциального спроса на авиаперевозки пассажиров и грузов на основе ввода актуальных данных, учета изменяющихся параметров внешних факторов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Fioriti, M., Vercella, V., Viola, N. Cost-estimating model for aircraft maintenance. *Journal of Aircraft*, 2018, Vol. 55, Iss. 4, pp. 1564–1575. DOI: 10.2514/1.C034664.
2. Кородок И. С., Гринев Д. М. Методические особенности определения себестоимости услуг регулярных пассажирских авиаперевозчиков для различных видов коммерческой загрузки // *Транспортное дело России*. – 2019. – № 1. – С. 147–150. EDN: XZDTQL.
3. Фридлянд А. А., Кузьмин А. В. Анализ динамики себестоимости и тарифов на авиатранспортном рынке России // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. – 2019. – № 27. – С. 75–85. EDN: GESVLP.
4. Фридлянд А. А., Кузьмин А. В. Анализ тенденций и динамики ценообразования на крупнейших внутренних воздушных линиях России // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. – 2017. – № 18 (329). – С. 84–94. EDN: ZIOWZF
5. Сушко О. П., Корягин Н. Д. Моделирование цен авиаперевозок пассажиров // *Мир транспорта*. – 2022. – Т. 20. – № 5 (102). – С. 54–63. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-5-7.

6. Vasigh, B., Fleming, K., Tacker, T. *Introduction to Air Transport Economics: From Theory to Applications*. Aldershot, Hampshire: Ashgate Publishing Limited, 2008, 388 p. ISBN 9780754670797.

7. Abdelghany, A., Abdelghany, Kh. *Modelling Applications in the Airline Industry*. London, Routledge, 2010, 296 p. ISBN 978-0-7546-7874-8. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315595818> [доступ для подписчиков].

8. Комаристых Е. Н. Прогнозирование финансовых результатов деятельности авиакомпаний на рынке пассажирских авиаперевозок // *Маркетинг услуг*. – 2014. – № 1. – С. 77–81. EDN: HUWVOF.

9. Ткаченко Т. В. Современные тенденции и направления развития рынка пассажирских авиаперевозок // *Транспортное дело России*. – 2021. – № 4. – С. 35–37. DOI: 10.52375/20728689_2021_4_35.

10. Шафар И. В. Формирование цены на авиабилеты // *Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт*. – 2023. – № 3 (45). – С. 33–42. EDN: FJAVKA.

11. Чайка Н. К. Подходы к оценке экономической эффективности воздушного судна в условиях импортозамещения // *СТИН*. – 2023. – № 6. – С. 74–78. EDN: KWPGYB.

12. Ключков В. В., Русанова А. Л., Максимовский В. И. Экономико-математическое моделирование процессов освоения серийного производства новых гражданских самолетов // *Вестник Московского авиационного института*. – 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 235–245. EDN: MTYNGF.

13. Richmond, S. B. Forecasting Air Passenger Traffic by Multiple Regression Analysis. *Journal of Air Law and Commerce*, 1955, Vol. 22, Iss. 4, pp. 434–444. [Электронный ресурс]: <https://scholar.smu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2955&context=jalc>. Доступ 24.01.2024.

14. Washington, S., Karlaftis, M. G., Mannering, F., Anastasopoulos, P. *Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis*. 3rd ed. New York, Chapman and Hall/CRC, 2020, 496 p. DOI: 10.1201/9780429244018 [доступ для подписчиков].

15. Ключков В. В., Охапкин А. А. Международное регулирование в области защиты окружающей среды от воздействия авиации и новые вызовы экономической безопасности России // *Экономическая безопасность*. – 2021. – № 4. – С. 1329–1346. DOI: 10.18334/ессес.4.4.113245.

16. Охапкин А. А. Оценка потерь российской авиационной отрасли в связи с внедрением Схемы возмещения и сокращения эмиссии углерода для международной авиации (CORSIA) // *Экономическая безопасность*. – 2022. – Т. 5. – № 4. – С. 1615–1632. DOI: 10.18334/ессес.5.4.116288.

17. Долбня М. С., Рахматуллина А. Ш., Зайцева И. В. Влияние «Системы компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации» на формирование авиационного тарифа // *Актуальные проблемы социально-гуманитарных наук и межкультурной коммуникации: язык, культура, образование и экономика: материалы Третьей международной научно-практ. конференц. Санкт-Петербург. 28–29 апреля 2022.* – С. 323–329. EDN: HQRBGH. ●

Информация об авторах:

Урюпин Илья Вадимович – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН), Москва, Россия, iuryupin93@yandex.ru.

Власенко Андрей Олегович – старший научный сотрудник ООО «Межотраслевой аналитический центр» (ООО «МАЦ»), Москва, Россия, andrey.vlasenko84@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 29.01.2024, одобрена после рецензирования 04.06.2024, принята к публикации 09.06.2024.





Цифровые технологии в грузовых авиаперевозках



Василий Егорович Жуков

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова (СПбГУГА), Санкт-Петербург, Россия.

РИНЦ SPIN-код: 6931-6423, РИНЦ Author ID: 525856.

✉ vasizhukov@yandex.ru.

Василий ЖУКОВ

АННОТАЦИЯ

Развитие современного воздушного транспорта неразрывно связано с поступательным ростом объемов грузовых авиаперевозок. Авиационная отрасль является одной из самой наукоемких и сложных отраслей экономики. Соответственно технологические процессы, происходящие в отрасли, опираются на достижения науки и совершенствовании информационного обеспечения, которое принимает цифровую форму. Сквозные цифровые технологии нашли широкое применение в развитии гражданской авиации страны. Предметом исследования в этой статье является анализ существующих технологий цифровой трансформации при организации процесса перевозки грузов. Этот процесс можно разделить на этапы: оформление перевозки, обработка груза на складе отправления, доставка и загрузка на борт воздушного судна, перевозка, разгрузка и доставка на склад прибытия, обработка груза на складе аэропорта прибытия, выдача груза получателю. Каждый из перечисленных этапов имеет в своем составе дискретный набор операций, которые в общей совокупности превращают дискретный процесс в непрерывный. Основными сквозными цифровыми

технологиями можно назвать большие данные; нейротехнологии и искусственный интеллект; системы распределенного реестра; квантовые технологии; новые производственные технологии; промышленный интернет; компоненты робототехники и сенсорики; технологии беспроводной связи; технологии виртуальной и дополненной реальностей.

Задача, поставленная в исследовании, – это анализ мирового и отечественного опыта применения цифровых трансформаций, части перечисленных цифровых технологий в организации грузовых перевозок воздушным транспортом. Рассматривается также вопрос организации грузовых «хабов» и, как следствие, интеграции грузовых авиаперевозок.

Решение поставленной задачи предусматривает наличие ограничений, связанных со спецификой перевозки грузов, так как каждый вид транспорта имеет свои особенности, связанные с обработкой грузового потока, и организация работы грузового двора железнодорожной станции будет отличаться от организации работы грузового терминала аэропорта.

Ключевые слова: грузовые авиаперевозки, цифровые трансформации, технологические процессы, цифровые платформы.

Для цитирования: Жуков В. Е. Цифровые технологии в грузовых авиаперевозках // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-13>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика грузовых авиаперевозок

Важность грузовых авиаперевозок возрастает по мере экономического развития. Грузовые авиаперевозки являются неотъемлемой частью глобальной торговой системы [1]. Анализ темпов грузовых авиаперевозок, представленный в отчете Международной ассоциации воздушного транспорта (IATA), показывает положительную динамику в течение последних трех лет. Глобальный спрос на авиаперевозки грузов, выраженный количественно в тонно-километрах (Cargo Tonne-Kilometres, СТК), в октябре 2023 года составил 21,9 млрд ткм. Это на 3,8 % больше по сравнению с аналогичным периодом прошлого года. Несмотря на этот рост, показатели отрасли остаются несколько ниже уровня, существовавшего до пандемии. Устойчивый ежегодный рост СТК с августа 2023 года свидетельствует о продолжающемся восстановлении мирового рынка грузовых авиаперевозок и является позитивным сигналом для завершения года с более высокими показателями (рис. 1¹).

Общая динамика роста грузовых тонно-километров с учетом сезонных колебаний, из отчета IATA, представлена на рис. 2.

Подходы к изучению предмета исследования

Операции по обработке грузов играют важную роль в грузовых авиаперевозках, и их можно разделить на несколько групп:

- оформление заказа на отправку груза;
- доставка груза в аэропорт (на грузовой терминал аэропорта);
- обработка груза на складе терминала, комплекс операций по категорированию груза, взвешиванию, маркировке, упаковке, пакетированию, комплектованию на рейс, проверка безопасности груза;
- оформление перевозочных документов;
- взимание платы [2].

Дискретность процесса обработки груза требует четкой организации процесса, в связи с чем процессы цифровых трансформаций находят все большее применение в обеспечении процесса грузоперевозок.

Цифровая трансформация – это процесс, который включает интеграцию цифровых

технологий в различные аспекты деятельности организации или отрасли, коренным образом меняющий методы ведения бизнеса, оптимизирующий процессы и создающий ценность [3].

В контексте устойчивого развития транспорта цифровая трансформация предполагает использование технологий и решений, основанных на данных, для решения экологических, социальных и экономических проблем, связанных с транспортными системами [4].

Благодаря использованию цифровых платформ, сбору данных в режиме реального времени и передовой аналитике транспортные организации могут оптимизировать свою деятельность, сводя к минимуму перегруженность, сокращая время в пути и оптимизируя маршруты [5].

Приведенная малая часть ключевых положений, содержащихся в научных статьях, посвященных вопросам цифровой трансформации в сфере транспорта, подчеркивает важность необходимости изучения этого вопроса.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Цифровизация перевозочных документов

Как уже было отмечено, перевозка груза начинается с оформления перевозочных документов. Грузовая авианакладная (AWB) – основной документ, регламентирующий процесс перевозки. AWB реализует ниже следующие функции в соответствии с содержащейся в ней информацией:

- договор перевозки – соглашение между грузоотправителем и перевозчиком, в котором указаны условия перевозки грузов;
- свидетельство о получении товара авиакомпанией – после подписания это юридическое доказательство того, что авиаперевозчик получил товар для перевозки (в случае возникновения каких-либо споров);
- отслеживание отправки – номер AWB является важной информацией, позволяющей отслеживать груз (также в ней указаны детали маршрута и коды аэропортов);
- контактная информация всех сторон – контактные данные всех вовлеченных сторон;
- накладная на перевозку – информация о расходах, связанных с процессом отправки, поэтому AWB может служить счетом или инвойсом вместе с подтверждающими документами, а также поддерживать процесс учета;

¹ IATA Air Cargo Market Analysis October 2023. [Электронный ресурс]: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-cargo-market-analysis—october-2023>. Доступ 19.05.2024.



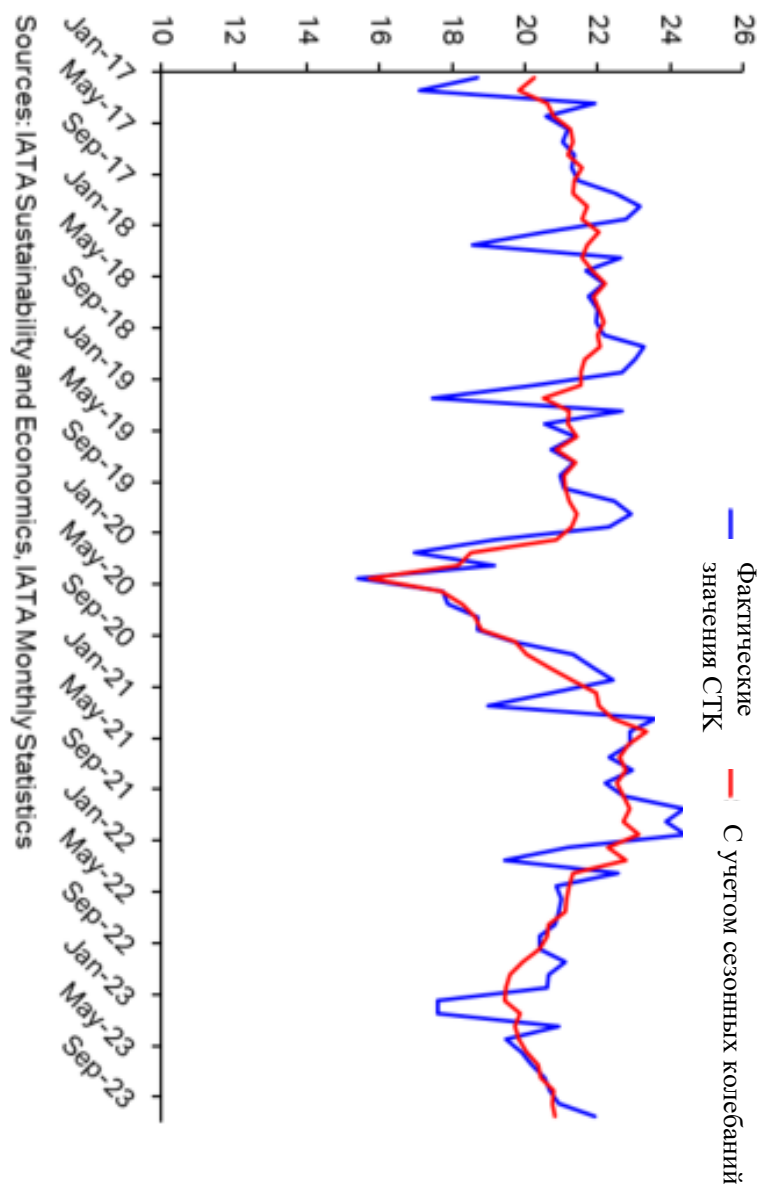


Рис. 1. Глобальные СТК (миллиарды тонн в месяц)¹.

– таможенная декларация – это один из основных документов, требуемых таможенными органами для разрешения перевозки грузов;

– описание товара – подробная информация о количестве, весе, размерах, стоимости и характере перевозимых товаров;

– руководство по обработке и доставке товаров – могут быть включены специальные инструкции по обращению с отправкой, например, для опасных, хрупких или грузов чувствительных к перепадам температуры;

– страховой сертификат – свидетельство о том, что груз застрахован, содержащее по-

дробную информацию о страховом покрытии.

Для каждой отправки требуется набор сопроводительных документов, которые необходимо хранить, распространять и отслеживать. В 2010 году IATA представила электронную авианакладную (e-air waybill или e-AWB), которая стала договором перевозки по умолчанию для всех грузовых авиаперевозок с 1 января 2019 года. Это часть программы IATA по электронным перевозкам, направленной на оцифровку отрасли и переход на безбумажный формат. Она направлена на повышение эффективности, качества данных, экономичности и устойчи-

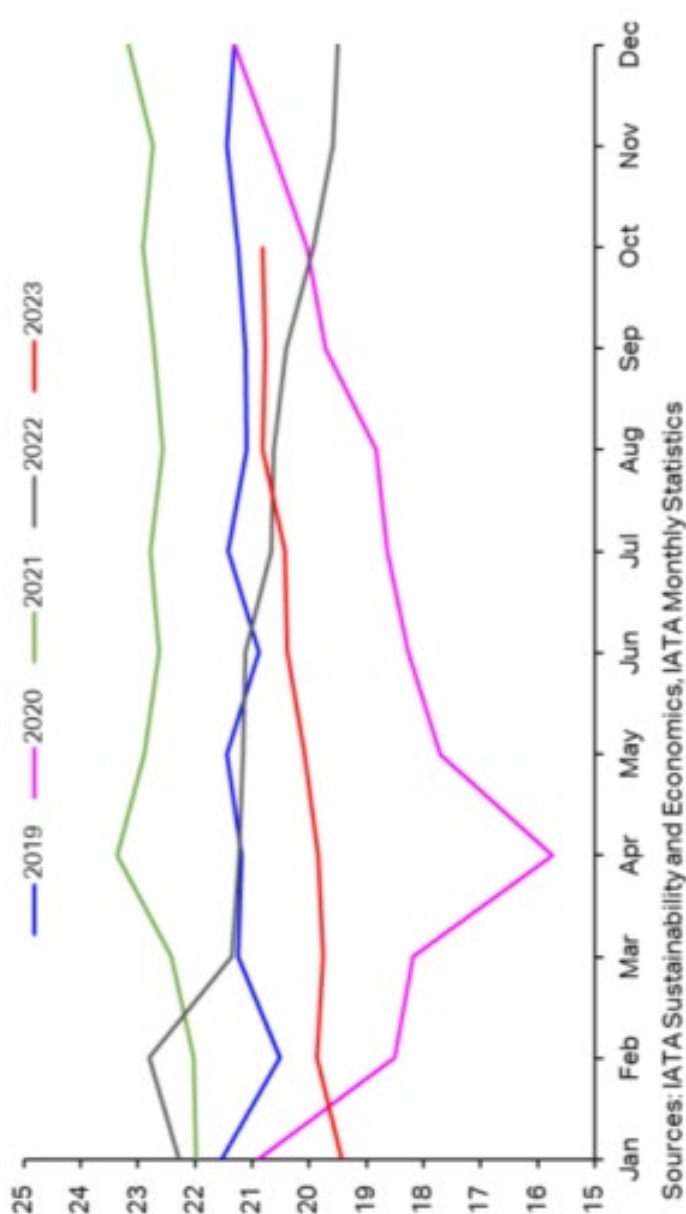


Рис. 2. Ежемесячные СТК с учетом сезонных колебаний (в миллиардах тм)¹.

ности (устранение более 7800 тонн бумажных документов ежегодно), а также на другие преимущества для индустрии грузовых авиаперевозок.

Сегодня, в соответствии с Резолюцией 672 по многосторонним электронным авиаанклавным², бумажные авиаанклавные больше не требуются. Это означает, что ими по-прежнему можно пользоваться, но IATA и ее члены в основном перешли на электронную версию,

которая быстрее обрабатывается и обменивается, проще в хранении и организации и намного безопаснее для окружающей среды. Разработано подробное руководство для экспедиторов о том, о том, как интегрировать e-AWB³.

Цифровые платформы

Цифровая трансформация организации процесса грузоперевозок воздушным транс-

² IATA Resolution 672. Form of Multilateral E-Air Waybill Agreement. [Электронный ресурс]: <https://www.iata.org/contentassets/783ac75f30d74e32a8eaf26af5696b6/csc-672-en-28dec2019.pdf>. Доступ 15.03.2024.

³ Sauv, D. E-AWB Implementation Playbook. February 2022. [Электронный ресурс]: <https://www.iata.org/contentassets/4bc75639b37641ba88f2e81e5516a020/e-awb-implementation-playbook.pdf>. Доступ 19.05.2024.



портом идет по пути создания программного обеспечения для цифровых платформ.

Например, «Score» от компании Riege Software – это полноценная транспортно-экспедиционная платформа для управления морскими и воздушными международными перевозками⁴. Функциональные возможности авиаперевозок включают автоматическое создание e-AWB, администрирование номера AWB перевозчика, подключение к системам сообщества грузовых перевозок для обмена сообщениями и многое другое.

Цифровая грузовая платформа Magaya⁵ автоматизирует многочисленные рабочие процессы в цепочке поставок, включая подключение перевозчиков через AWB и обмен электронными AWB-сообщениями.

Logitude⁶ также предлагает полноценную облачную платформу для пересылки грузов с надежными сервисами e-AWB, которые включают не только генерацию и обмен e-AWB, но и мониторинг статистики, отслеживание сроков доставки, отчетность и многое другое.

Smart AWB⁷ – это очень простое в использовании облачное решение, которое позволяет экспедиторам создавать, распечатывать, отправлять и отслеживать электронные AWB.

Альтернативой приобретению конкретного инструмента может быть интеграция с одной или несколькими платформами обмена данными. Эти глобальные сообщества грузовых авиаперевозок обеспечивают точный и эффективный обмен информацией, объединяя все стороны, участвующие в процессе перевозки (авиакомпании, грузовых агентов / экспедиторов, агентов по наземному обслуживанию, грузоотправителей, таможенно и т.д.).

Примерами одних из наиболее крупных из них являются следующие.

TRAXON cargo HUB⁸ от компании CHAMP – крупнейшая платформа, обеспечивающая сервисное обслуживание грузовых авиаперевозок, электронную связь между более чем 100 авиакомпаниями и более чем 3000 экспедиторами. Это помогает автоматизировать бронирование, операции, обработку документов и таможенные процессы. TRAXON поддерживает все типы сообщений, среди которых те, которые связаны с обменом e-AWB, бронированием, проверкой статуса, сообщениями об ошибках и другими. Для подключения к платформе предоставляются API (интерфейс прикладного программирования).

Всемирная информационная сеть (WIN)⁹ – это платформа, которая обслуживает в основном независимых экспедиторов грузов, предлагая им простое подключение к более чем 160 авиакомпаниям для электронного бронирования и генерации e-AWB, обмена и отслеживания. К WIN можно получить доступ через Интернет или через интеграцию с API веб-сервиса. Кроме того, она предлагает мобильное приложение для грузоотправителей, которое поддерживает отслеживание отправок, отправку запросов на тариф и так далее.

Cargonaut¹⁰ управляет информационной платформой Cargo Community в Схипхолье (Амстердам), крупнейшем голландском грузовом авиаузле. Она поддерживает обмен данными между всеми сторонами грузоперевозок и оптимизирует соответствующие процессы в аэропорту.

Распределенный реестр (блокчейн)

Совершенствование системы управления грузовыми перевозками будет реализовываться в системе распределенного реестра (блокчейн). Использование этой системы позволит сделать более эффективным процесс отслеживания груза и движение сопровождающих груз документов – авианакладных, таможенных деклараций, счетов-фактур, упаковочных листов, паспортов безопасно-

⁴ Logistics Software for Sustainable Growth Scope. [Электронный ресурс]: <https://www.riege.com/>. Доступ 19.05.2024.

⁵ Logistics software enabling you to move smarter, faster, and with full control. [Электронный ресурс]: <https://www.magaya.com/>. Доступ 15.03.2024.

⁶ Electronic Air Waybill for Freight Forwarders. [Электронный ресурс]: <https://logitudeworld.com/eawb/>. Доступ 15.03.2024.

⁷ Smart AWB [Электронный ресурс]: <https://www.smartawb.com/>. Доступ 15.03.2024.

⁸ Traxon cargo HUB. [Электронный ресурс]: <https://www.champ.aero/products/champ-ecargo/traxon-cargohub>. Доступ 15.03.2024.

⁹ FREIGHTOSCOPE™. [Электронный ресурс]: <https://www.winwebconnect.com/index.html>. Доступ 15.03.2024.

¹⁰ Schiphol and Cargonaut start using updated IT cargo platform. [Электронный ресурс]: <https://www.schiphol.nl/en/cargo/news/schiphol-and-cargonaut-start-using-updated-it-cargo-platform/>; <https://cargonaut.nl/>. Доступ 15.03.2024.

сти, доверенностей на получение груза и других. Система электронного документооборота и интернет вещей соединяются в общей системе распределенного реестра.

Блокчейн – это децентрализованная технология транзакций и хранения данных, которая помогает частным лицам и компаниям хранить и делиться ценностями без использования обычных посредников [6]. Это передовая технология, способная перевернуть традиционные экономические и социальные структуры и заменить их системами, которые являются более доступными, надежными и стабильными. Технология блокчейн основана на глобально распределенной «бухгалтерской книге», которая регистрирует и утверждает транзакции, используя свойства масштабной одноранговой сети [7]. База данных блокчейна – это постоянный архив транзакций, которые происходят между частными лицами или между клиентами и предприятиями. Существует множество реализаций блокчейна, которые все еще находятся в стадии разработки. Стоимость транзакции доступна любому пользователю сети с привилегиями доступа, что делает систему транзакций с поддержкой блокчейна чрезвычайно прозрачной [8]. Это очень затрудняет проведение мошеннических транзакций. Однако при совершении транзакции пользователь сети выбирает, какой информацией о своей личности он хочет поделиться с остальной частью сети, что приводит к использованию псевдонимов. Цифровые технологии способны разрушить эти барьеры, позволяя цепочке поставок стать по-настоящему взаимосвязанным рынком, полностью открытым для всех заинтересованных сторон – от производителей сырья, товаров и комплектующих до перевозчиков готовой продукции этих поставщиков и, в конечном счете, для конечных пользователей [9].

Формирование целевого решения поставленной задачи

Интеграция интернета вещей и технологий блокчейн в интеллектуальные транспортные системы потенциально способна преобразовать грузовую отрасль, обеспечивая эффективное, безопасное и достоверное отслеживание грузов и управление ими по всей цепочке поставок. Используя датчики интернета вещей для отслеживания грузов в режиме реального времени и храня данные на

децентрализованной платформе блокчейн, можно устранить посредников, снизив затраты и повысив прозрачность. Использование смарт-контрактов может автоматизировать многие процессы, сокращая ручное вмешательство и повышая скорость и точность транзакций [10].

Технология блокчейн – ведение распределенного реестра должно соответствовать процессу физического перемещения груза из пункта отправки через грузовой терминал пункта отправки на борту воздушного судна в грузовой терминал пункта назначения. Процесс отслеживания движения груза невозможен без интернета вещей (IoT). Интернет вещей, или сокращенно IoT, – это термин, обозначающий концепцию подключения широкого спектра устройств к Интернету – и друг к другу. По сути, IoT – это огромная глобальная сеть подключенных устройств, приспособлений, машин и людей, использующих их. Все устройства, подключенные к IoT, собирают данные о своем использовании и средах, в которых они работают, и обмениваются ими. «Интернет вещей (IoT), являясь важной частью информационных технологий нового поколения, подключает любой объект к Интернету в соответствии с согласованным протоколом посредством радиочастотной идентификации, глобальной системы позиционирования и другого информационно-измерительного оборудования для обмена информацией и коммуникации. Непрерывное развитие технологии интернета вещей придало новые силы ее дальнейшему развитию и усовершенствованию. Интернет транспортных средств (IoV) находится в центре внимания IoT» [11].

Управление цепочками поставок – тонкая и многогранная область, и по мере масштабирования бизнеса она может стать очень сложной. В ходе одной поставки могут выполняться десятки операций и задач одновременно. Соединение технологий интернета вещей и блокчейна позволит управлять большими объемами грузовых перевозок и станет важным этапом внедрения новых цифровых методов, включая создание цифровых платформ, даст возможность оптимизировать маршруты грузовых перевозок. В частности, одно из перспективных направлений развития перевозок грузов воздушным транспортом – это создание грузовых «хабов» и использование для этих целей сети грузовых аэропортов. Идея далеко не новая, например, в США, созданы грузовые хабы на



базе аэропортов «Рикенбакер – Коламбус» (Огайо), «Стоктон Метрополитен» (Калифорния) [12]. В Китае открыт специализированный грузовой аэропорт в Эчжоу¹¹. В истории развития российской гражданской авиации предпринималась попытка создать грузовой аэропорт на базе бывшего военного аэродрома «Вещево», программой развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2020 года, предусматривалось строительство грузового аэропорта «Усть-Луга»¹².

Применение узловой сети и системы перевалки грузов может привести к существенной экономии транспортных расходов, при этом количество узлов и их расположение являются решающими факторами.

Цифровые платформы и технологии позволяют сделать управление грузовыми перевозками через узловые грузовые аэропорты-хабы прозрачным для грузовой клиентуры и эффективным для перевозчика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ уже применяемых в грузовых авиаперевозках цифровых технологий и оценка перспектив их развития в ходе дальнейших исследований должен быть дополнен изучением сфер внедрения таких сквозных цифровых технологий, как большие данные; нейротехнологии и искусственный интеллект; квантовые технологии; новые производственные технологии; промышленный интернет; компоненты робототехники и сенсорики; технологии беспроводной связи; технологии виртуальной и дополненной реальностей.

¹¹ Китай открывает первый в Азии специализированный грузовой аэропорт в Эчжоу, провинция Хубэй в Центральном Китае. [Электронный ресурс]: <https://www.globaltimes.cn/page/202207/1270695.shtml>. Доступ 15.03.2024.

¹² Программа развития транспортной системы Санкт-Петербурга и Ленинградской области на период до 2020 года. Утверждена Координационным советом по развитию транспортной системы г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области: Том 5, С. 16, 9 сентября 2014 года.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Merkert, R., Van de Voorde, E., de Wit, J. Making or breaking – Key success factors in the air cargo market. *Journal of Air Transport Management*, 2017, Vol. 61, pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2017.02.001.
2. Budiarto, S., Putro, H. P., Pradono, P., Yudoko, G. Revenue management of air cargo service in theory and practice. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, Vol. 158, Iss. 1, 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/158/1/012022.
3. Warner, K. S. R., Wäger, M. Building Dynamic Capabilities for Digital Transformation: An Ongoing Process of Strategic Renewal. *Long Range Planning*, 2018, Vol. 52, Iss. 3, pp. 326–349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2018.12.001>.
4. Bibri, S. E., Krogstie, J. A Novel Model for Data-Driven Smart Sustainable Cities of the Future: A Strategic Roadmap to Transformational Change in the Era of Big Data. *Future Cities and Environment*, 2021, Vol. 7, 25. DOI: 10.5334/fce.116.
5. Zhu, L., Yu, F. R., Wang, Y., Ning, B., Tang, T. Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, Vol. 20, Iss. 1, pp. 383–398. DOI: 10.1109/TITS.2018.2815678.
6. Yuan, Y., Wang, F.-Y. Towards Blockchain-based Intelligent Transportation Systems. 19th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2016), Rio de Janeiro, Brazil, 2016, pp. 2663–2668. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795984.
7. Qian, Yongfeng; Jiang, Yingying; Chen, Jing; Zhang, Yu; Song, Jeungeun; Zhou, Ming; Pustišek, M. Towards decentralized IoT security enhancement: A blockchain approach. *Computers and Electrical Engineering*, 2018, Vol. 72, pp. 266–273. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2018.08.021.
8. Pervez, H., Haq, I. U. Blockchain and IoT Based Disruption in Logistics. In: 2019 2nd International Conference on Communication, Computing and Digital systems, C-CODE 2019, pp. 276–281. DOI: 10.1109/C-CODE.2019.8680971.
9. Helo, P., Shamsuzzoha, A. H. M. Real-time supply chain – a blockchain architecture for project deliveries. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, Vol. 63, 101909. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101909.
10. James, M., Chinchy, M. Blockchain and IoT Integration for Smart Transportation in Cargo. The 2nd International Conference on Modern Trends in Engineering Technology and Management: December 2023, pp. 274–281. DOI: <https://doi.org/10.21467/proceedings.160.35>.
11. Lv, H., Lloret, J., Song, H. Guest Editorial Introduction to the Special Issue on Internet of Things in Intelligent Transportation Infrastructure. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, Vol. 24, Iss. 11, pp. 12843–12851. DOI: 10.1109/TITS.2023.3324790.
12. Schwieterman, J. P., Hague, E. The Rise of Cargo-Focused Hub Airports: Pandemic Year 2020. [Электронный ресурс]: https://www.researchgate.net/publication/351274481_The_Rise_of_Cargo-Focused_Hub_Airports_Pandemic_Year_2020. Доступ 19.05.2024. ●

Информация об авторе:

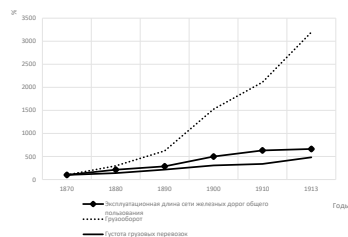
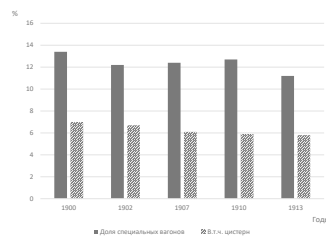
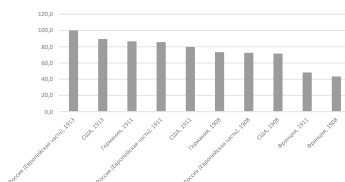
Жуков Василий Егорович – кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова (СПбГУГА), Санкт-Петербург, Россия, vasizhukov@yandex.ru.

Статья поступила в редакцию 19.05.2024, одобрена после рецензирования 16.09.2024, принята к публикации 20.09.2024.



ИСТОРИЯ ИННОВАЦИЙ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ 112

Инновации как неотъемлемая движущая сила развития железных дорог в России в конце XIX – начале XX века. Хронология и взаимосвязь развития инфраструктуры, роста перевозок и совершенствования технических решений.



КОЛЕСО ИСТОРИИ





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656(091).073

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-14>

Инновационная основа укрепления рыночных позиций железных дорог (на примере российского рынка грузовых перевозок конца XIX – начала XX вв.)



Дмитрий МАЧЕРЕТ



Анастасия КУДРЯВЦЕВА

Дмитрий Александрович Мачерет¹,
Анастасия Валерьевна Кудрявцева²

^{1, 2}Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»); Объединенный ученый совет ОАО «РЖД»; Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

¹ ORCID: 0000-0002-1322-3030; РИНЦ Author ID: 380766.

² ORCID: 0000-0001-6813-9867; РИНЦ Author ID: 763551.

✉ ¹ macheretda@rambler.ru.

АННОТАЦИЯ

Формирование в России к концу XIX века масштабной железнодорожной сети способствовало значительному ускорению социально-экономического развития страны, в том числе благодаря увеличению объемов, повышению качества и эффективности грузовых перевозок.

Целью описанного в статье исследования является анализ расширения масштабов деятельности и укрепления позиций железных дорог России на рынке грузовых перевозок в конце XIX – начале XX века и выявление значимости для этого происходившего в отрасли внедрения инноваций с использованием методов исторического и статистического анализа, оценки инновационности технических средств и бенчмаркинга.

В ходе исследования выявлено, что возрастание экономической роли железных дорог, в том числе – их доли на рынке грузовых перевозок в рассматриваемый период определялось синергией роста протяженности железнодорожной сети и все более интенсивного ее использования благодаря инновационно-ориентированному развитию железнодорож-

ной отрасли. Инновации охватывали все аспекты развития железных дорог страны: строительство и содержание железнодорожной инфраструктуры, конструкцию подвижного состава и организацию его использования. В частности, высокий динамизм инновационного улучшения конструктивных характеристик товарных паровозов и вагонов подтверждается ростом соответствующих коэффициентов инновационности.

Инновационно-ориентированное развитие российских железных дорог в рассматриваемый период позволило им занять ведущие позиции на национальном рынке грузовых перевозок и, как свидетельствуют выполненные межстрановые сравнения, добиться мирового лидерства по ряду ключевых производственно-экономических показателей. Этот исторический опыт весьма интересен в современных условиях, когда железные дороги на инновационной основе решают долгосрочные задачи эффективного позиционирования на рынке транспортно-логистических услуг.

Ключевые слова: транспортная система, железные дороги, рынок грузовых перевозок, конкурентоспособность, интенсивность грузовых перевозок, эффективность грузовых перевозок, инновационно-ориентированное развитие.

Для цитирования: Мачерет Д. А., Кудрявцева А. В. Инновационная основа укрепления рыночных позиций железных дорог (на примере российского рынка грузовых перевозок конца XIX – начала XX вв.) // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 112–122. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-14>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
English translation of the full text of the article is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Приближающееся двухсотлетие железных дорог является хорошим стимулом к углублению исследований по истории железнодорожного транспорта, в том числе – экономической. Россия была одной из первых стран в мире (седьмой по счету [1]), где было создано железнодорожное сообщение – уже в 1837 году, через 12 лет после появления первой железной дороги и через 7 лет после того, как железнодорожное сообщение с паровой тягой получило признание в качестве эффективного и перспективного вида транспорта [2; 3, С. 15]. Хотя в течение трех десятилетий после этого железнодорожная сеть в нашей стране развивалась невысокими темпами, затем, в условиях проведения глубоких социальных реформ, были созданы институциональные механизмы, обеспечившие кардинальное ускорение железнодорожного строительства [4–6]. Темпы ввода новых железнодорожных линий резко возросли с 1868 года [7, С. 35], а к концу 1870-х годов в стране была создана масштабная железнодорожная сеть протяженностью свыше 20 тыс. км, соединившая в единое экономическое пространство основные регионы Европейской части страны и способствовавшая ускорению социально-экономического развития [8; 9].

В 1890-е годы были достигнуты рекордные в российской истории темпы строительства железных дорог [10], и к началу XX века Россия вышла на второе место в мире по протяженности железнодорожной сети [11]. При этом происходило качественное совершенствование железнодорожной техники и организации перевозочного процесса, что, вместе с позитивным влиянием развития железнодорожного транспорта на экономику страны, было раскрыто в работах [1; 7–9; 12–15] и ряде других.

Тем не менее, многие аспекты развития российских железных дорог в XIX – начале XX века требуют дополнительного изучения и осмысления.

Цель данной статьи – проанализировать расширение масштабов деятельности и укрепление позиций железных дорог России на рынке грузовых перевозок в указанный период и раскрыть значимость для этого происходившего в отрасли внедрения инноваций. Для достижения указанной цели использованы *методы* исторического и статистиче-

ского анализа, а также оценка инновационности технических средств и бенчмаркинг.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Рост значимости железных дорог в транспортной системе России

В дожелезнодорожную эпоху основными видами транспорта в России, как и в других странах, были гужевой и внутренний водный. При этом возможности провоза грузов по грунтовым дорогам были ограничены из-за осенней и весенней распутицы. Время ограниченности проезда составляло, например, в Курской и Тульской губерниях четыре месяца в году, Пензенской и Рязанской – четыре, пять, Костромской – шесть, а в Пермской, Вологодской, Архангельской и ряде других – большую часть года [16, С. 129]. Как отмечал основоположник экономики железнодорожного транспорта А. И. Чупров, «иногда бывало такое бездорожье, что извозчики, сложивши товары, разбегались», доставка же товара в установленный срок «была делом совершенной удачи» [17, С. 13]. Продолжительность навигации на внутренних водных путях была ограничена периодом от вскрытия (окончательной очистки водного пути ото льда) до замерзания и составляла пять-семь месяцев в году [17; 18]. Эти транспортные ограничения крайне негативно влияли на экономическое и социальное развитие страны. Тем не менее, водные пути сообщения, в навигационный период обладавшие высокой провозной способностью, рассматривались как основа магистральных грузовых перевозок.

В ходе дискуссий о возможности и необходимости строительства железных дорог в России, развернувшихся в начале 1830-х годов, некоторые сторонники их строительства рассматривали железные дороги как вспомогательные транспортные артерии, ведущие к основным судоходным рекам, по которым осуществлялась внутрироссийская торговля на дальние расстояния. Противники же железнодорожного строительства аргументировали свою позицию в том числе и тем, что железнодорожное сообщение уступает более дешевой водной транспортировке товаров [19]. Таким образом, можно говорить о существовании в то время консенсуса по поводу ведущей роли внутреннего водного транспорта в реализации магистральных перевозок товаров. Однако, как бывало со мно-



Таблица 1

Распределение магистральных грузовых перевозок в России между железнодорожным и внутренним водным транспортом в конце XIX – начале XX века

Годы	Объем грузовых перевозок, млн тонн			Доля железнодорожного транспорта, %
	Водный транспорт	Железнодорожный транспорт	Суммарно	
1876–1880 (в среднем)	13,956	17,248	31,204	55,3
1881–1885 (в среднем)	13,956	23,227	37,183	62,5
1886–1890 (в среднем)	16,626	29,50	46,126	64,0
1891–1895 (в среднем)	20,115	37,183	57,298	64,9
1896–1898 (в среднем)	27,584	49,943	77,527	64,4
1913	50,90	158,20	209,10	75,7

Источник: составлено и рассчитано авторами по данным [13; 18; 20].

Таблица 2

Изменение коэффициентов перевозимости железнодорожным транспортом некоторых важнейших товаров в конце XIX – начале XX века

Годы	Товары		
	Хлеб (зерно)	Каменный уголь	Нефть
1882–1886 (в среднем)	0,163
1892–1896 (в среднем)	0,221	0,643	0,196
1902–1906 (в среднем)	0,232	0,727	0,168
1913	0,221	0,782	0,473

Источник: [1].

Таблица 3

Распределение перевозок основных родов грузов между железнодорожным и внутренним водным транспортом в Европейской части России (по данным за 1898 год), %

Грузы	Железнодорожный транспорт	Внутренний водный транспорт
Главные хлеба	69,4	30,6
Соль	61,5	38,5
Каменный уголь	98,6	1,4
Нефтяные продукты	47,7	52,3
Лесные строительные материалы и дрова	31,1	68,9
Прочие	82,0	18,0
Всего	64,9	35,1

Источник: рассчитано авторами по данным Приложения к Статистическому сборнику МПС. Вып. 59. – СПб., Отделение статистики и картографии МПС, 1900.

гими прорывными инновациями и до, и после железных дорог, их внедрение не только опровергло доводы скептиков, но и превзошло ожидания сторонников. Уже во второй половине 1870-х годов железные дороги выполняли почти на 24 % больший объем грузовых перевозок, чем внутренний водный транспорт, и в дальнейшем их доля поступательно росла (табл. 1).

Все бóльшая доля важнейших транспортоспособных товаров, производимых в стране, перевозилась по железным дорогам (табл. 2). При этом возникла специализация видов транспорта: уголь, соль, хлебные грузы в большей степени перевозились по железным дорогам, лесные строительные материалы и дрова – по водным путям сообщения (табл. 3). С точки

зрения конкурентоспособности железных дорог на транспортном рынке и их роли в экономике страны важно, что бóльшая часть «прочих» грузов (куда входили разнообразные виды готовой продукции, предназначенной как для производственного, так и для личного потребления) уже в конце XIX века перевозилась именно по железным дорогам. В последующем также происходил ускоренный рост железнодорожных перевозок многих видов таких товаров. Например, в 1909–1913 годах по сравнению с периодом 1894–1900 годов, среднегодовые объемы железнодорожных перевозок свежих фруктов, плодов и ягод возросли почти в 2,6 раза, свежих овощей – в 3,8 раза, железа, стали и чугуна – в 2,4 раза, сельскохозяйственных машин –

в 4,8 раза [14, С. 323–324].

Основными преимуществами железнодорожных перевозок были регулярность и более высокая скорость. При этом приводима А. И. Чупровым и относящаяся к 1870-м годам оценка средней обычной скорости доставки грузов по железным дорогам на большие расстояния «в 300 верст¹ в сутки» [17, С. 13] представляется завышенной. Впрочем, в то время для таких оценок и не было необходимой статистической базы. Первые обследования скорости продвижения грузов, перевозимых повагонными отправками, на российских железных дорогах были проведены в августе-сентябре 1907, 1910, 1911, 1912 годов по ряду конкретных маршрутов [21, С. 59]. Средние значения скорости доставки на этих маршрутах колебались от 100 до 148 километров в сутки. Обобщение результатов указанных обследований позволило определить, что среднее значение скорости доставки для всех них составляло 141 км/сут. при средней дальности перевозки 1103 км (что более чем вдвое превышало среднесетевую дальность перевозки того периода²). Полученное значение скорости доставки, по современным меркам, невелико. Однако оно полностью совпадает со среднесетевым значением скорости доставки повагонных отправок в соответствующем поясе дальности по данным за сентябрь 1949 (!) года³, когда был введен регулярный учет скорости и сроков доставки грузов. (Совпадение месяца с периодами проведения вышеупомянутых обследований имеет существенное значение, так как скорость доставки грузов значимо различается по сезонам года [22; 23].) Таким образом, технологические преимущества железных дорог – всесезонность перевозок, срочность доставки грузов, высокая провозная способность – в сочетании с удешевлением доставки на дальние расстояния [8; 17] обусловили повышение их значимости в транспортной системе России и увеличение доли на рынке магистральных грузовых перевозок. При этом местные перевозки на небольшие расстояния

(до 25 км) оставалось более выгодно осуществлять гужевым транспортом [16, С. 128]. Специализация и взаимодействие различных видов внутреннего транспорта – железнодорожного, водного и гужевого – позволяли товаровладельцам выстраивать наиболее выгодные схемы доставки своих товаров на различные рынки.

В контексте данного исследования важно, что уже с конца XIX века железные дороги играли на российском рынке грузовых перевозок ведущую и все более значимую роль. Следует отметить, что укрепление позиций железных дорог на российском рынке грузовых перевозок коррелирует с ускорением развития экономики страны в конце XIX – начале XX века [15; 24]. Это подтверждает дискуссионный характер выводов Нобелевского лауреата Роберта Фогеля, который, на основе построения контрфактической модели экономики США XIX века, пришел к заключению, что отсутствие железных дорог и использование вместо них внутренних водных путей затормозило бы экономическое развитие лишь на несколько лет [25; 26], и свидетельствует в пользу оправданности мнения, что модель Фогеля не полностью учитывала макроэкономические эффекты от развития железнодорожной сети, в частности, связанные с ускорением грузовых перевозок [27]. Есть все основания полагать, что только на основе развития железнодорожного сообщения в ведущих экономиках мира могли быть достигнуты в ту эпоху столь впечатляющие результаты, которые отмечаются в современных макроэкономических исследованиях [11; 27; 28].

Рост масштабов и интенсивности железнодорожных грузовых перевозок

Повышение экономической значимости железных дорог, их доли на рынке грузовых перевозок, безусловно, было связано с развитием железнодорожной сети, протяженность которой с 1870 по 1913 год увеличилась более чем в 6,6 раза, и, по мере этого роста, все новые районы, населенные пункты, предприятия получали непосредственный доступ к железнодорожному сообщению. Но, отмечая рост протяженности железных дорог, необходимо обратить внимание и на все более интенсивное их использование. Густота грузовых перевозок, определяемая как отношение грузооборота к эксплуатационной длине сети, росла ненамного медленнее, чем сама

¹ 1 верста = 1 066,8 м

² Это обстоятельство значимо, т.к. с ростом дальности перевозки скорость доставки грузов имеет тенденцию к росту [22].

³ Продолжительность доставки и скорость продвижения грузов на железных дорогах в 1949–1953 гг. Материалы по статистике железнодорожного транспорта. Выпуск 267. – М., 1953. – 232 с.



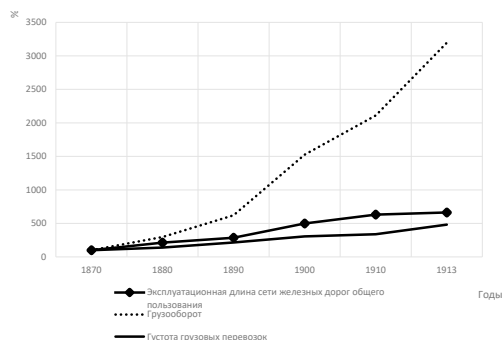


Рис. 1. Динамика развития и использования для грузовых перевозок сети железных дорог России в конце XIX – начале XX века (1870 г. = 100 %).
Источник: рассчитано авторами по данным [7; 12; 18].

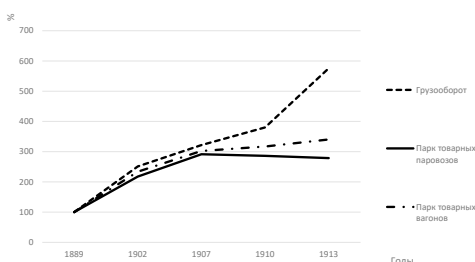


Рис. 3. Сопоставление динамики грузооборота и парков товарного подвижного состава на сети железных дорог России (без дорог местного значения) в конце XIX – начале XX века. Источник: рассчитано авторами по данным [18; 29].

сеть железных дорог (более чем в 4,8 раза за тот же период), что, в синергии с ростом сети, позволило увеличить грузооборот почти в 32 раза (рис. 1).

Рост густоты грузовых перевозок обеспечивался, во-первых, за счет увеличения насыщенности сети подвижным составом (рис. 2), что является свидетельством повышения степени использования пропускной способности железных дорог (при этом фактические размеры движения могли превосходить расчетные [29, С. 102]) и роста их провозной способности. Последнее также подтверждается тем, что количество вагонов росло быстрее количества паровозов. Это значит, что повышались состав и вес поезда, и даже при том же числе поездов можно было увеличить объемы грузовых перевозок.

Еще более наглядно характеризует рост провозных способностей железных дорог сопоставление динамики грузооборота и парков товарного⁴ подвижного состава (рис. 3). Более быстрый рост грузооборота по сравнению с парком товарных вагонов свидетель-

⁴ Тогда было принято использовать этот термин.

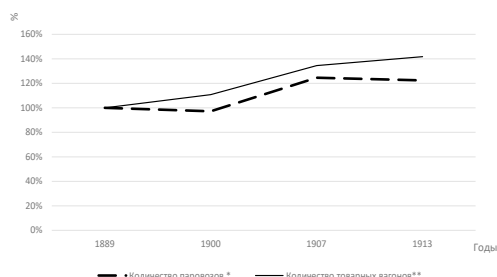


Рис. 2. Динамика насыщенности сети железных дорог России подвижным составом в конце XIX – начале XX века (1889 г. = 100 %).
* Доля пассажирских паровозов составляла 15–20 %.
** В 1907–1913 гг. – включая вспомогательные.
Источник: рассчитано авторами по данным [7; 18; 29].



Рис. 4. Динамика средней дальности грузовых перевозок на сети железных дорог России в конце XIX – начале XX века. Источник: рассчитано авторами по данным [18; 29].

ствует о росте динамической нагрузки и производительности вагона. А более быстрый рост парка вагонов по сравнению с парком паровозов, как уже было отмечено, – о росте среднего состава и веса поезда. Оба фактора в совокупности характеризуют рост производительности использования паровозов и провозной способности железных дорог.

Важной характеристикой расширения географических масштабов железнодорожных грузовых перевозок является достаточно устойчивая тенденция повышения их средней дальности (рис. 4), которая усилилась после того, как, благодаря строительству Великого Сибирского пути – Транссибирской магистрали, железнодорожная сеть шагнула за Урал и достигла Тихого океана [30; 31].

Следует отметить, что в ходе дискуссий о вариантах организации транспортного сообщения Сибири и Дальнего Востока с Европейской частью страны вновь проявилась альтернативность железнодорожного и водного транспорта. Некоторые ученые, в частности, А. И. Чупров [32, С. 180], и государственные деятели, в частности И. А. Вышнеградский [33, С. 54], который занимал пост министра

финансов в 1887–1892 гг., выступали за то, чтобы не сооружать сплошной рельсовый путь через восточные регионы страны, а лишь соединить железными дорогами речные бассейны, сформировав, таким образом, железнодорожно-водное сообщение и сократив требуемую протяженность железнодорожных линий более чем вдвое. Будучи менее затратной, реализация подобного проекта, безусловно, не позволила бы обеспечить ни такую регулярность и скорость перевозок, ни такую провозную способность и не открыла бы столь масштабные перспективы долгосрочного социально-экономического развития Сибири и Дальнего Востока, как создание непрерывного железнодорожного сообщения от Европейской части страны до Тихого океана, которое, в итоге, было осуществлено [30; 31].

При строительстве Транссиба был реализован ряд инновационных решений, от механизации земляных работ, включая применение «многоковшовых экскаваторов, изготовленных на Путиловском заводе», а также грузовых автомобилей [31, С. 199], до уникальных инженерных решений в области искусственных сооружений [30; 34].

При этом и в целом развитие российских железных дорог в конце XIX – начале XX века было инновационно-ориентированным, что заслуживает детального рассмотрения.

Инновационная основа роста интенсивности и эффективности грузовых железнодорожных перевозок

Ретроспективный анализ основных инноваций в сфере железнодорожного транспорта показывает, что если в 1830-е – 1840-е годы большинство таких инноваций появлялось в Великобритании, то уже начиная с 1850-х годов все больше инноваций осуществлялось в России [35, С. 55–58]. Их реализация давала возможность более интенсивно и экономично использовать инфраструктуру и подвижной состав, тем самым повышая предложение железнодорожных грузовых перевозок и укрепляя позиции железных дорог на этом рынке.

Крупнейшей инновацией в области организации грузовых перевозок, носившей не только технологический, но и институциональный характер, «была оригинальная система взаимного пользования товарными вагонами» [1, С. 66], полностью внедренная

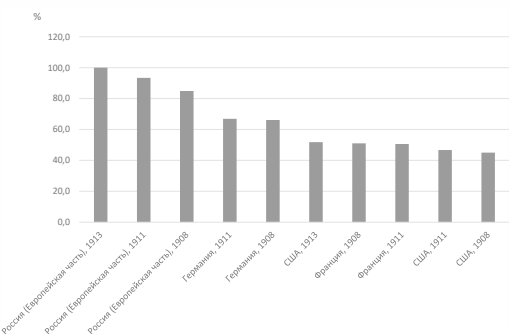


Рис. 5. Сопоставление уровня и динамики производительности товарных вагонов (в расчете на единицу грузоподъемности) ведущих железнодорожных систем мира в начале XX века, %.
Источник: составлено авторами по данным [1].

в 1889 году после более чем 20 лет совершенствования взаимодействия между железными дорогами в сфере использования товарных вагонов [7, С. 63–65]. В рамках этой системы «весь товарный вагонный парк сети одной ширины колеи может быть предоставлен в бесплатное общее пользование всех дорог при условии:

1. Постоянного сохранения размера вагонного парка каждой отдельной дороги.
2. Постоянного сохранения установленного качества и состояния товарных вагонов» [1, С. 67].

Систему взаимного пользования товарными вагонами можно считать прообразом современной экономики совместного использования ресурсов [36–38]. Внедрение этой системы позволило реализовать бесперегрузочное сообщение между всеми железными дорогами России, тем самым значительно ускорив и удешевив перевозки товаров и обеспечив, в синергии с иными технико-технологическими инновациями, существенно более производительное и поступательно улучшавшееся использование вагонов по сравнению с другими железнодорожными системами. Это наглядно видно из данных рис. 5, сформированного на основе метода бенчмаркинга, активно используемого в научных исследованиях в сфере железнодорожного транспорта [39; 40].

Эффективное использование товарных вагонов способствовало интенсификации использования инфраструктуры для грузовых перевозок (рис. 6). Анализ данных, приведенных на рис. 5 и 6, с использованием методологии, предложенной лауреатом Нобелевской премии по экономике Эдмундом Фелпсом [41], позволяет сделать вывод о высоком



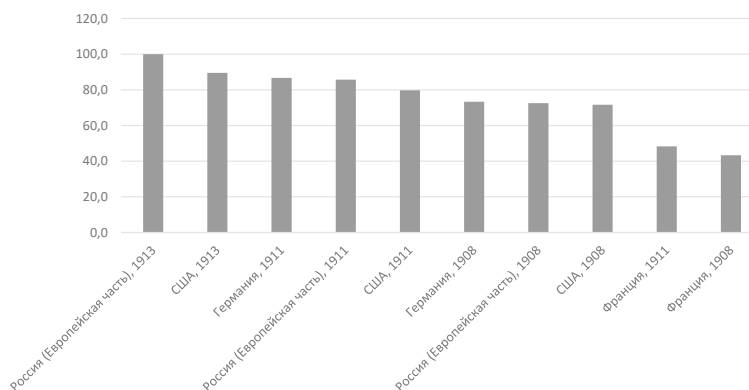


Рис. 6. Сопоставление уровня и динамики производительности использования железнодорожной инфраструктуры для грузовых перевозок (густоты грузовых перевозок) ведущих железнодорожных систем мира в начале XX века, %. Источник: рассчитано авторами по данным [1].

уровне динамизма, т.е. стремления и способности к инновациям, российских железных дорог в начале XX века.

Инновации охватывали все аспекты развития железных дорог страны.

В путевом хозяйстве важнейшими инновациями были переход к использованию стальных рельсов, применение рельсов более тяжелых типов, совершенствование рельсовых креплений, использование пропитки шпал, совершенствование системы содержания и ремонта пути [1; 42]. На ряде дорог испытывали и применяли инновационные конструкции подрельсового основания с использованием бетона, асфальтобетона и железобетона [43; 44].

Совершенствовался подвижной состав. Благодаря ряду улучшающих инноваций повышалась мощность паровозов, совершенствовалось парораспределение, увеличивались давление в котле и нагрузка на ось. На этой основе открывались возможности для повышения веса и скорости поездов, роста экономичности перевозок. Современные методы оценки инновационности технических средств [45–47] дают возможность, на основе данных [48], оценить динамику роста инновационности товарных паровозов, производившихся в России в конце XIX – начале XX века (табл. 4).

На инновационной основе происходило и качественное улучшение парка товарных вагонов – рост грузоподъемности и грузоместимости, снижение коэффициента тары и др. [1; 49]. Значительный рост уровня инновационности был характерен для вагонов разных типов (табл. 5), включая вагоны повы-

шенной грузоподъемности, появившиеся в начале XX века (табл. 6).

Важной составляющей инновационного развития подвижного состава было производство и использование специализированных товарных вагонов. Уже в 1862 году появились вагоны-ледники для перевозки скоропортящихся грузов, в 1868 году – думпкары – вагоны с опрокидывающимся кузовом для насыпных грузов, а в 1872 году – цистерны отечественного производства [42, С. 89–90]. Выпускались и другие типы специализированных вагонов [1, С. 101]. К началу XX века доля специализированных вагонов в парке превышала 13 % (рис. 7). Хотя в последующие годы она не росла, более того, увеличение количества специализированных вагонов отставало от общего темпа роста парка, парк специализированных вагонов позволял удовлетворять растущий спрос на перевозки немассовых грузов. При этом появлялись принципиально новые вагоны. Например, в 1910 году был построен первый изотермический вагон с механическим охлаждением [49, С. 40]. В целом, специализация вагонного парка способствовала укреплению позиций железных дорог на рынке грузовых перевозок.

Важно отметить, что инновации внедрялись конкретными железными дорогами, являвшимися субъектами транспортного рынка и заинтересованными в повышении своей эффективности и конкурентоспособности [1, С. 65–66, 94–96, 102]. В случае успеха их применение расширялось, вплоть до общесетевого. Показательным примером стало увеличение грузоподъемности нормального

Таблица 4

Повышение уровня инновационности российских
товарных паровозов в XIX – начале XX века

Серия паровоза	Начало постройки, год	Мощность, л. с.	Давление в котле, атм.	Нагрузка на ось, тс	Скорость, км/ч	Коэффициент инновационности
Д	1845	140	8	11	15	1
Г	1863	150	8	11	20	1,10
О ^д	1897	400	11	12	50	2,16
О ^в	1905	420	11	12	50	2,20
Щ	1906	550	14	14	65	2,82
Э	1912	1000	12	16	65	3,61

Источник: составлено и рассчитано авторами по данным [48].

Таблица 5

Повышение уровня инновационности
российских товарных вагонов в XIX – начале XX века

Род вагона	Тип конструкции вагона	Начало постройки, год	Удельная грузоподъемность, т/ось	Удельная грузоместимость, м³/ось	Удельная площадь пола, м²/ось	Коэффициент тары	Коэффициент инновационности
Крытые	Петербург-Московской дороги	1846	2,05	9,775	4,9	0,95	1
	Петербург-Варшавской дороги	1860	4,1	23,1	8,9	0,73	1,87
	Петербург-Московской дороги, перестроенный из четырехосного в двухосный	1863	4,7	19,55	9,8	0,78	1,88
	Нетормозной Ковровских мастерских со шпренгелями	1870	5	20,05	8,75	0,58	1,98
	Нетормозной Коломенского завода	1879	6,25	18,1	7,9	0,52	2,08
	Нормальный 12,5 т нетормозной	1892	6,25	20,0	8,8	0,54	2,16
	Нормальный 16,5 т нетормозной	1911	8,25	19,5	8,8	0,43	2,50
Платформы	Петербург-Московской дороги	1846	2,5	-	5,625	0,60	1
	Петербург-Варшавской дороги	1860	6,25	-	8,7	0,39	1,86
	Коломенского завода	1878	6,75	-	11,75	0,38	2,12
	Трехосная	1881	5,0	-	7,87	0,48	1,55
	Нормального типа нетормозная	1892	6,25	-	12,45	0,54	1,94
Полувагоны	Для перевозки угля с деревянной рамой кузова	1861	5,0	4,0	-	0,42	1
	Для перевозки угля со стальными швеллерами, нетормозной	1880	6,25	10,0	-	0,48	1,54
Цистерны	Для перевозки нефти нетормозная	1872	5,0	5,85	-	0,62	1
	Для перевозки нефти нормального типа, нетормозная	1895	7,5	7,75	-	0,50	1,35
	Для перевозки бензина	1908	7,5	9,25	-	0,58	1,38

Источник: составлено и рассчитано авторами по данным [49].



Таблица 6

Повышение уровня инновационности российских товарных вагонов повышенной грузоподъемности в XIX – начале XX века

Род вагона	Тип конструкции вагона	Начало постройки, год	Удельная грузоподъемность, т/ось	Удельная грузовместимость, м³/ось	Нагрузка от оси колесной пары на рельс, кН	Коэффициент тары нетормозного вагона	Коэффициент инновационности
Крытые	Московско-Казанской дороги без тележек	1905	6,875	16,4	109	0,45	1
	Юго-Западных дорог	1906	9,375	25	138	0,48	1,27
	Средне-Азиатской дороги	1909	9,375	19,5	144	0,55	1,21
	Екатерининской дороги	1906	8,33	25	119	0,42	1,22
Платформы	Петербург-Варшавской дороги	1903	8,25	-	109	0,42	1
	Удлиненная	1908	8,25	-	125	0,51	0,99
Полувагоны	Угольный	1908	7,5	9	130	0,40	1
	С металлическим кузовом	1906	9,375	12,5	134	0,43	1,15
	Екатерининской дороги	1906	8,33	10,7	113	0,36	1,06
Цистерны	Владикавказской и Казанской дорог	1895	6,25	7,25	97	0,54	1
	Юго-Восточных дорог	1898	8,25	9,5	119	0,45	1,26

Источник: составлено и рассчитано авторами по данным [49].

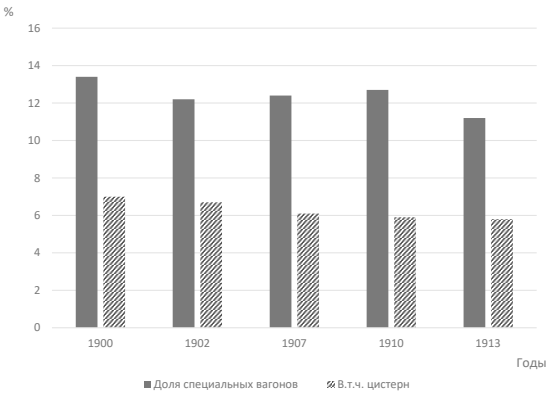


Рис. 7. Изменение уровня специализации товарных вагонов на сети железных дорог России в начале XX века. Источник: рассчитано авторами по данным [18].

товарного вагона с 900 до 1000 пудов⁵ в 1907 году на Юго-Восточных железных дорогах. Вскоре она стала применяться на Екатерининской и Владикавказской железных дорогах, а с 1910 года была узаконена Министерством путей сообщения для всей сети железных дорог [1, С. 65].

Система взаимного пользования товарными вагонами, в свою очередь, «выросла» из договоренностей между соседними железными дорогами об организации бесперегру-

зочного сообщения и была окончательно реализована также на основе соглашения между железными дорогами, уже общесетевого [7, С. 64–65]. При этом не произошло создания «общего парка» вагонов на основе его централизации, а было обеспечено взаимное использование парков, принадлежащих конкретным дорогам. Этот опыт примечателен в контексте современных дискуссий об оптимизации управления парком грузовых вагонов [50].

На основе инновационно-ориентированного развития российских железных

⁵ 1 пуд – 16,38 кг.

дорог в условиях растущего в стране товарного производства и рынка перевозок, при проведении рациональной правительственной экономической политики [14; 51; 52], были достигнуты высокие показатели эффективности железнодорожной отрасли. К началу XX века по уровню отдачи на вложенный капитал железные дороги России занимали второе место среди ведущих железнодорожных систем мира [12, С. 303], а по уровню экономической эффективности текущей деятельности (по критерию минимума коэффициента эксплуатационных издержек) в 1913 году лидировали [53, С. 103].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ развития железнодорожного транспорта в конце XIX – начале XX века, выполненный на примере железнодорожной отрасли России, позволил установить, что уже в первой фазе эволюции железнодорожного транспорта – фазе преимущественно экстенсивного развития [27, С. 130], на инновационной основе осуществлялась интенсификация деятельности железных дорог, которая стала базой развития и роста эффективности отрасли во второй фазе ее эволюции [27, С. 131–133]. Инновационно-ориентированное развитие российских железных дорог в рассматриваемый период, положительное влияние на которое оказала мультицентричность выработки и реализации инновационных решений, позволило им занять ведущие позиции на национальном рынке грузовых перевозок и добиться мирового лидерства по ряду ключевых производственно-экономических показателей.

Этот исторический опыт весьма интересен в современных условиях, когда железные дороги на инновационной основе решают долгосрочные задачи эффективного позиционирования на рынке транспортно-логистических услуг [54].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Столетие железных дорог. – М.: Транспечать, 1925. – 261 с.
2. Smil, V. *Energy and Civilization: A History*. Cambridge, MA, The MIT Press, 2017, 564 p. ISBN 9780262338301.
3. Сотников Е. А. Железные дороги мира из XIX в XXI век. – М.: Транспорт, 1993. – 200 с.
4. Головачев А. А. История железнодорожного дела в России. – М.: Издательский дом «Дело» РАНХиГС, 2016. – 534 с. ISBN 978-5-7749-1167-7.
5. Голубев А. А. Концессионный расцвет российской чугунки // Отечественные записки. – 2013. – № 3 (54). – С. 271–282. EDN: RWIPHP.
6. Мачерет Д. А., Епишкин И. А. Взаимное влияние институциональных и транспортных факторов экономического развития: ретроспективный анализ // *Journal of Institutional Studies*. – 2017. – Т. 9. – № 4. – С. 80–100. DOI: 10.17835/2076-6297.2017.9.4.080-100.
7. Сотников Е. А., Левин Д. Ю., Алексеев Г. А. История развития системы управления перевозочным процессом на железнодорожном транспорте (отечественный и зарубежный опыт): Монография. – М.: Техинформ, 2007. – 237 с. EDN: TUAPLT.
8. Загорский К. Я. Экономика транспорта. – М. – Л.: Госиздат, 1930. – 368 с.
9. Мачерет Д. А. Создание сети железных дорог и ускорение развития страны // *Мир транспорта*. – 2012. – Т. 10. – № 4 (42). – С. 184–192. EDN: PFFKVX.
10. Хусаинов Ф. И. Краткая история железнодорожных грузовых тарифов в России // *Экономическая политика*. – 2015. – Т. 10. – № 5. – С. 91–141. DOI: 10.18288/1994-5124-2015-5-05.
11. Мачерет Д. А., Валеев Н. А., Кудрявцева А. В. Формирование железнодорожной сети: диффузия эпохальной инновации и экономический рост // *Экономическая политика*. – 2018. – Т. 13. – № 1. – С. 252–279. DOI: 10.18288/1994-5124-2018-1-10.
12. Соловьева А. М. Железнодорожный транспорт России во второй половине XIX в. – М.: Наука, 1975. – 318 с.
13. Лященко П. И. История народного хозяйства СССР. – Том II. Капитализм. – М.: Госполитиздат, 1952. – 736 с.
14. Давыдов М. А. Двадцать лет до Великой войны: российская модернизация Витте–Столыпина. – СПб.: Алетей, 2016. – 1081 с. ISBN 978-5-90670-504-4.
15. Мачерет Д. А. Развитие железнодорожной сети и «большой экономический рынок» в России // *Мир транспорта*. – 2022. – Т. 20. – № 5 (102). – С. 104–112. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-5-12.
16. Гольц Г. А. Гужевой транспорт и гужевые пути сообщения в России. (Исторический очерк) // *Россия и современный мир*. – 2007. – № 1 (54). – С. 119–139. EDN: NYTJWX.
17. Чупров А. И. Железнодорожное хозяйство. Его экономические особенности и его отношения к интересам страны. – М.: Типография А. И. Мамонтова и Ко, 1875. – 362 с.
18. Беспалов Н. Г., Елисеєва И. И. Железные дороги России в XX веке в зеркале статистики. – СПб.: Нестор-История, 2008. – 226 с. ISBN 978-5-981-872-396.
19. Schenk, F. B. *Russlands Fahrt in die Moderne. Mobilität und sozialer Raum im Eisenbahnzeitalter*. Stuttgart, Franz Steiner, 2014, 456 p. [Электронный ресурс]: https://www.academia.edu/9342941/Russlands_Fahrt_in_die_Moderne_Mobilität_und_sozialer_Raum_im_Eisenbahnzeitalter Stuttgart 2014. Доступ 05.09.2023.
20. Вольфсон Л. Я., Ледовской В. И., Шильников Н. С. Экономика транспорта. – М.: Трансжелдориздат, 1941. – 688 с.
21. Кочетов И. В. Железнодорожная статистика. – М.: Трансжелдориздат, 1953. – 304 с.
22. Мандриков М. Е. Эффективность и пути ускорения доставки грузов. – М.: Транспорт, 1974. – 88 с.
23. Чернигина И. А. Экономическая оценка времени доставки грузов на железнодорожном транспорте в современных условиях / Дисс. ... канд. экон. наук. – М.: МИИТ, 1991. – 189 с.
24. Смирнов С. В. Динамика промышленного производства в СССР и России. Часть I. Опыт реконструкции, 1861–2012 годы // *Вопросы экономики*. – 2013. – № 6. – С. 59–83. DOI: 10.32609/0042-8736-2013-6-59-83.



25. Fogel, R. W. Notes on the Social Saving Controversy. *Journal of Economic History*, 1979, Vol. 39, Iss. 1, pp. 1–55. [Электронный ресурс]: <https://www.jstor.org/stable/2118909>. Доступ 20.11.2023.
26. Fogel, R. W. Railroads and American economic growth: essays in econometric history. John Hopkins University Press, 1964, 296 p. [Электронный ресурс]: <https://archive.org/details/railroadsamerica00foge/page/n7/mode/2up>. Доступ 20.11.2023.
27. Лапидус Б. М., Мачерет Д. А. Макроэкономический аспект эволюции железнодорожного транспорта // *Вопросы экономики*. – 2011. – № 3. – С. 124–137. DOI: 10.32609/0042-8736-2011-3-124-137.
28. Григорьев Л. М., Морозкина А. К. Успешная неустойчивая индустриализация мира: 1880–1913. – М.: СПб.: Нестор-История, 2021. – 176 с. ISBN 978-5-4469-1912-3.
29. Хачатуров Т. С. Экономика транспорта. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. – 588 с.
30. Пивовар Е. И., Архипова Т. Г., Бокарев Ю. П., Галиева Д. С. [и др.]. История железнодорожного транспорта России, XIX–XXI вв. / Под ред. Е. И. Пивовара. – М.: Издательский Дом Мещерякова, 2012. – 736 с. ISBN 978-5-91045-509-6.
31. Левин Д. Ю. Строительство Великого Сибирского пути // *Мир транспорта*. – 2020. – Т. 18. – № 3 (88). – С. 190–213. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-190-213.
32. Чупров А. И. Из прошлого русских железных дорог: статьи 1874–1895 гг. – М.: Изд-во М. и С. Сабашниковых, 1909. – 314 с.
33. Волмар К. Транссибирская магистраль: История создания железнодорожной сети России / Пер. с англ. – М.: Кучково поле, 2016. – 272 с. ISBN 978-5-9950-0669-5.
34. Левин Д. Ю. Золотая пряжка стального пояса России. К 120-летию Кругобайкальской железной дороги // *Мир транспорта*. – 2021. – Т. 19. – № 1 (92). – С. 260–271. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-260-271.
35. Измайкова А. В. Экономическая оценка инновационно-ориентированного развития железнодорожного транспорта / Дисс. ... канд. экон. наук. – М.: МГУПС, 2016. – 182 с.
36. Tsypin, P., Macheret, D., Kapustina, N. V. The Problem of Specific Railway Transport Resources Sharing. In: F. Gaol, N. Filimonova, & C. Acharya (Ed.), *Impact of Disruptive Technologies on the Sharing Economy*. IGI Global, 2021, pp. 13–27. DOI: 10.4018/978-1-7998-0361-4.ch002.
37. Kelly, K. *The Inevitable. Understanding the 12 Technological Forces that will Shape Our Future*. N.Y.: Penguin Books, 2017, 336 p. DOI: 10.1080/24751448.2017.1292803.
38. Shor, J. B., Walker, E. T., Lee, C. W. [et al]. On the Sharing Economy: sharing, caring and profit. Contexts, Winter 2015, Vol. 14, Iss. 1, pp. 12–19. DOI: 10.1177/1536504214567860.
39. Грудников А. А., Макарова Е. А. К вопросу о применении бенчмаркинга на железнодорожном транспорте // *Сибирская финансовая школа*. – 2015. – № 2 (109). – С. 78–80. EDN: TTMKQD.
40. Валеев Н. А. Позиционирование железнодорожного транспорта на рынке транспортных услуг // *Экономика железных дорог*. – 2023. – № 5. – С. 25–34. EDN: DAUYLM.
41. Phelps, E. *Mass Flourishing: How Grassroots Innovation Created Jobs, Challenge, and Change*. – Princeton University Press, Princeton, NJ, 2013, xii + 378 pp. DOI: 10.1007/s11127-014-0166-2.
42. Левин Д. Ю. История железнодорожного транспорта. – Ростов н/Д: Феникс, 2018. – 414 с. ISBN 978-5-222-28294-6.
43. Разуваев А. Д. Экономическая оценка создания, эволюции и стратегического развития транспортной инфраструктуры (на примере железнодорожного транспорта): Монография. – М.: Прометей, 2021. – 286 с. ISBN 978-5-00172-251-9.
44. Разуваев А. Д. История развития сухопутной транспортной инфраструктуры: техническая база и экономические аспекты. Часть 2 // *Мир транспорта*. – 2022. – Т. 20. – № 1 (98). – С. 106–112. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-1-12.
45. Мутанов Г. М., Есенгалиева Ж. С. Метод оценки инновационности и конкурентоспособности инновационных проектов // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 3–3. – С. 712–717. EDN: PAZBLH.
46. Сергеев К. А., Козлов М. П., Котуранов В. А. Показатели инновационности технических решений по конструкциям грузовых вагонов, имеющие численные оценки // *Наука и техника транспорта*. – 2012. – № 4. – С. 95–97. EDN: PIVONN.
47. Титова Т. С., Бороненко Ю. П., Покровская О. Д. Оценка инновационности новых грузовых вагонов // *Транспорт Российской Федерации*. – 2022. – № 3 (100). – С. 23–28. EDN: IXUVOI.
48. Лукашев В. И. Научно-технический прогресс и экономическая эффективность транспортного производства (макроэкономическая оценка). – М.: Интекст, 2003. – 351 с. ISBN 5-89277-048-6.
49. Шадур Л. А. Развитие отечественного вагонного парка. – М.: Транспорт, 1988. – 279 с. ISBN 5-277-00104-2.
50. Хусаинов Ф. И. Научно-практический семинар «Экономика железнодорожного транспорта» // *Экономика железных дорог*. – 2019. – № 3. – С. 73–76. EDN: YZRZJN.
51. Тери Э. Экономическое преобразование России / Пер. с фр. – М.: РОССПЭН, 2008. – 183 с. ISBN 978-5-8243-0985-0.
52. Давыдов М. А. Модернизация Витте – Столыпина и ее специфика // *Вопросы теоретической экономики*. – 2017. – № 1 (1). – С. 109–131. EDN: YWIMYV.
53. Мачерет Д. А. Экономика первых пятилеток в «зеркале» железнодорожного транспорта // *Экономическая политика*. – 2015. – Т. 10. – № 4. – С. 87–112. DOI: 10.18288/1994-5124-2015-4-05.
54. Лапидус Б. М. Задачи опережающего развития Российских железных дорог // *Железнодорожный транспорт*. – 2023. – № 2. – С. 4–14. EDN: HYHNMH. ●

Информация об авторах:

Мачерет Дмитрий Александрович – доктор экономических наук, профессор, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»); первый заместитель председателя Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»; профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия, macheretda@rambler.ru

Кудрявцева Анастасия Валерьевна – кандидат экономических наук, доцент, Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»); научный сотрудник Объединенного ученого совета ОАО «РЖД»; доцент Российского университета транспорта, Москва, Россия, anastasiya.izmaykova@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.11.2023, одобрена после рецензирования 05.02.2024, принята к публикации 15.04.2024.



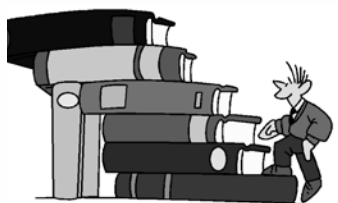
РЕЦЕНЗИЯ

124

*Прикладная аналитика.
Методология для будущих
и действующих аналитиков.*



КНИЖНАЯ ЛОЦИЯ



АВТОРЕФЕРАТЫ ДИССЕРТАЦИЙ

129

- Остаточный ресурс литий-ионных аккумуляторных батарей локомотивов.
- Взаимодействие внешнего и тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ.
- Мониторинг размывов грунта у опор железнодорожных мостов.
- Управление рисками в логистической системе грузовых железнодорожных перевозок.

НОВЫЕ КНИГИ

132

*Новые учебники и монографии
в сфере транспорта.*





Подготовка профессиональных аналитиков: сложные вопросы, непростые ответы



Василий Павлович Куприяновский

Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия.

✉ v.kupriyanovsky@rut.digital

Василий КУПРИЯНОВСКИЙ

АННОТАЦИЯ

Понкин И. В. Методология научных исследований и прикладной аналитики: Учебник. Издание 5-е, дополн. и перераб. В двух томах. Том 1: Прикладная аналитика (Мастерство и искусство аналитического мышления и аналитической работы) / Консорциум «Аналитика. Право. Цифра». – М.: Буки Веди, 2024. – 720 с. (Серия: «Методология и онтология исследований»). ISBN 978-5-4465-4179-9.

Учебник – повышенного уровня сложности, посвящен тематическому горизонту теории и методологии прикладной аналитики. Объяснены понятие, суть, природа, онтология прикладной аналитики (как рода специфической мыслительной деятельности и как ее продукта), ее функционально-видовое и отраслевое многообразие. Подробно описаны и разъяснены методы, технологии и инструменты прикладной аналитики, концепты и схемы в основе ее организации и реализации.

Ключевые слова: прикладная аналитика, наука, подготовка практиков-аналитиков, аналитические центры, преимущество в аналитическом обеспечении.

Описаны критерии оценивания аналитических процессов и продуктов. Учебник успешно апробирован на разных аудиториях.

Издание предназначено для профессиональных практиков-аналитиков (разных отраслей и направлений), преподавателей аналитики, руководителей и сотрудников научных и аналитических организаций и подразделений, заказчиков прикладных аналитических продуктов, соискателей ученых степеней и их научных консультантов / руководителей, научных работников и профессорско-преподавательского состава образовательных организаций, а также всех интересующихся этой тематикой.

Рецензия представляет собой некоторые размышления автора по поводу первого тома пятого издания «Методологии научных исследований и прикладной аналитики» авторства И. В. Понкина и иллюстрированного к нему приложения. Автор поднимает сложные вопросы подготовки профессиональных аналитиков.

Для цитирования: Куприяновский В. П. Подготовка профессиональных аналитиков: сложные вопросы, непростые ответы // Мир транспорта. 2024. Т. 22. № 4 (113). С. 124–128. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-15>.

Полный текст статьи в переводе на английский язык публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the review article in English is published in the second part of the issue.

Радикально повысить качество интеллектуальной подготовки (как научной, так и прикладной аналитической), выйти на оперативный простор высокой профессиональной аналитики, преодолеть огромный разрыв между высокопрофессиональным опытом и тотальной неопытностью, между неизвестной теорией и робкой практикой в прикладной аналитике – эти критически важные задачи стоят сегодня перед системой государственного управления в целом, но столь же актуальны и для инженерной подготовки, подготовки юристов, экономистов, управленцев. Увы, преподавать, учить интеллектуальным работам, мастерству и искусству аналитического мышления и аналитической работы – почти не по чему.

Наиболее яркое и вполне заслуженно здесь маркируемое исключение – учебник «Методология научных исследований и прикладной аналитики» д. ю. н., проф. И. В. Понкина (РАНХиГС, МГЮА). Работа выдержала уже несколько переизданий. Учебник можно смело назвать инструментом, развивающим интеллект и способности руководства, для научных исследователей и прикладных аналитиков, руководителей профильных подразделений.

Автор рецензии, признаться, уже давал свой отклик [1] на третье (однотомное) издание этого учебника [5], а потому не мог пропустить переиздание нового первого тома двухтомного учебника «Методология научных исследований и прикладной аналитики» за авторством И. В. Понкина [2] (второй том в 4-м пока издании – в соавторстве с А. И. Лаптевой [4]; в пятом издании, по словам авторов, второй том ждем лишь в 2025 году) и иллюстрированного приложения к этому двухтомнику – своего рода нулевого тома [3].

В основу учебника положены накопленные множеством других ученых и аналитиков экспертные знания и рефлексии, систематизированные и субстратно представленные И. В. Понкиным, но также и его собственный огромный опыт проведения экспертных работ, участия в научных исследованиях и в экспертном обеспечении государственного управления. Эти издания написаны профессионалом науки и аналитики для профессионалов науки и аналитики. Пять защитившихся под его научным руководством (консультированием) докторов юридических наук – уже вполне убедительный рубеж для признания уровня

профессионализма, равно как и объем его публикаций – более 900 работ, переведенных на 10 разных языков.

Учебно-методическая и инструктивная литература, которую стремится создать И. В. Понкин по тематике методологии научных исследований и прикладной аналитики, посвящена технологиям, методам, инструментам, практикам, «лайфхакам» профессиональной исследовательско-познавательной, аналитической работы, создавая отправные точки дискуссий высокого уровня для высококлассных ученых и прикладных аналитиков, наполнена именно такого рода текстами.

Выпуск таких изданий уже стал (и тенденция будет только все более фиксироваться и расширяться) шагом в направлении создания высокопрофессиональной литературы по базовой доктрине и методологии, полезной и для учебной деятельности, и для профессиональной исследовательской работы – как научно-исследовательской и опытно-конструкторской, так и прикладной аналитической.

И надо сказать, что устремления профессора Понкина создать всеобъемлющую и универсальную, но главное – эффективную систему, как он любит говорить, «постановки мозгов», действительно, способны находить и находят положительный отклик не только среди ученых-правоведов и практиков правовой аналитики (чему немало свидетельств в десятках вышедших рецензий на разные издания этого обширного и амбициозного труда).

Они, эти устремления, представляют интерес для специалистов технических и экономических направлений в науке и прикладной аналитике, отыскивая себе последовательных интересантов и учеников в этих направлениях, вызывая интеллектуальные брожения и дискуссии на разных уровнях.

Отличительными особенностями всех изданий «Методологии...» И. В. Понкина (частью в соавторстве с А. И. Лаптевой) является фокус именно на прикладных вопросах, хотя каждый раз под них подводится и необходимый теоретический базис, оперирование «сублимированными субстратами» знаний и инструктивных материалов. Совершенно отсутствуют разборки и споры с кем-либо, и нет ни малейшего намека на политизированность или идеологизированность выкладок и рекомендаций. Присутствует мощное многоуровневое «дробление» излагаемых



тематических направлений на многоуровневые иерархизированные ряды компактных сжатых блоков, излагающих и раскрывающих «простые» технологические вопросы.

Кратко рассмотрим содержание первого тома.

Введение определяет классический ввод в тему, излагает авторские замысел и концепцию, цели учебника и его парадигмальные основания, показывает, в каких дискуссиях предыдущие издания учебника нашли свое отражение.

Первая глава «Понятие, онтология и общая теория прикладной аналитики» содержит 13 параграфов и раскрывает тематические направления: понятие, природу и онтологию прикладной аналитики; видовое многообразие прикладной аналитики; кто такой аналитик; линейку образов-амплуа практика-аналитика; что составляет высший пилотаж в прикладной аналитике; должный объем квалификации главного аналитика (руководителя аналитического подразделения); понятие, устои, рамки и содержание общей теории прикладной аналитики; соотношение фактографии и прикладной аналитики; соотношение нормографии и прикладной аналитики; краткое субстратное изложение методологии прикладной аналитики (§ 1.10 – самый большой параграф главы первой, так что краткость тут относительно); понятие и значение интуиции в прикладной аналитике; отличия экспертного заключения практика-аналитика от прочих видов письма или иного изложения соображений; понятие и значение визуализации процесса и результатов прикладной аналитики.

Вторая глава посвящена конкретным инструментально-функциональным сегментам прикладной аналитики и включает шесть параграфов, раскрывая следующие тематические направления: понятие и особенности предиктивной прикладной аналитики; предскриптивная прикладная аналитика; понятие и особенности дескриптивной прикладной аналитики; понятие и особенности интеллектуализированной прикладной аналитики и прагматической прикладной аналитики; понятие и особенности диагностической (девиантологической) прикладной аналитики, особенности оперирования аномалиями в прикладной аналитике; понятие и особенности «посмертной» прикладной аналитики.

Третья глава посвящена подготовке и квалификации практиков-аналитиков, содержит восемь параграфов, раскрывая тематические направления: значение и особенности подготовки практиков-аналитиков; понимание должного в целенаправленном формировании профессионального практика-аналитика; описание некоторых наиболее нетривиальных и заслуживающих внимания методик подготовки в прикладной аналитике; особенности подготовки аналитиков в зарубежных спецслужбах; способы формирования способностей и навыков критического мышления у практиков-аналитиков; понятие и мера должного мастерства и искусства практика-аналитика задавать вопросы; стандарты надлежащего прикладного аналитического ремесла, мастерства и искусства; изложение формализованного перечня надлежащих знаний, умений, навыков, компетентностей и способностей практика-аналитика.

Четвертая глава излагает оценочные средства – критерии и параметры прикладной аналитики, состоит из 13 параграфов: дистинктивные (сущностные) и дескриптивные (описательные) параметры прикладной аналитики; аналитическая точность; сложность в прикладной аналитике; аналитическая беглость; аналитическая гибкость; аналитическая проницательность; краткость и простота в прикладной аналитике; метакогнитивная дистанцированность в прикладной аналитике; оценочная и интерпретационная определенность в прикладной аналитике; системность прикладной аналитики; аналитическая зрелость; аналитическая цепкость или хваткость; аналитический скептицизм.

Пятая глава излагает конкретные технологии и приемы прикладных аналитических работ, охватывая широкое многообразие таковых в 22 параграфах: общий ввод в тему; поиск данных в прикладной аналитике; аналитическое видение в проработке исследуемого материала; аналитическая разметка исследуемого текстового материала; фокусирование в прикладной аналитике; кристаллизация идей и выводов в прикладной аналитике; создание ценных идей в прикладной аналитике; прикладной аналитический синтез из мелких кусочков; аналитическое обогащение данных и аналитическое обогащение прикладного аналитического продукта; ключевой вопрос предфинальной подготовки прикладного аналитического продукта об упущенных

существенно важных моментах; понятие и техники прикладного аналитического письма; понятие и значение идеи и смекалки; нелинейность процесса работы над прикладным аналитическим продуктом; цикличность в прикладной аналитике; понятие, требования и технологии подготовки аналитического отчета; онтологии как инструментарий прикладной аналитики; понятие и особенности аналитического вчитывания в текст; оперирование образами в аналитике; переход на метаязык в аналитике; нелинейное мышление и линейное мышление в прикладной аналитике; первые шаги в создании исследовательского продукта; применение генеративных преобразованных трансформеров текстов на естественном языке (Chat GPT) в прикладной аналитике.

Шестая глава излагает 32 общепсихологических метода, соответственно включает 32 параграфа. В их числе: методы интуитивной аналитики; аналитические методы фреймирования, свертывания, развертывания, контраста; методы эксплицитно-структурированного, имплицитно-структурированного и дескриптивно-экспликативного теоретизирования; методы потоковой аналитики; метод упрощения онтологизированных образов научных или аналитических конструкций; метод сценарного моделирования; метод SWOT-анализа; аналитический метод особого мнения в группе; аналитический метод обратного движения с конца; аналитический метод переноса; аналитический метод усложнения задачи; метод дашборда; аналитический метод «рыбьего скелета»; метод древа текущей реальности; метод цветокодирования; метод карт ассоциаций; метод тегирования; метод построения причинно-следственной матрицы; метод древа отказов; метод аналитического аудирования; методы библиометрической аналитики; метод аналитической пирамиды; метод опорных точек; метод оперирования конкурирующими гипотезами; байесовский подход; метод аналитического оперирования стержневыми факторами; методы мозгового штурма и синектики; метод ситуационно-логической аналитики; метод морфологического анализа.



Седьмая глава излагает в пяти параграфах теорию и практику девиантологии прикладной аналитики: общий ввод в тематику; дефекты прикладной аналитики и девиантология прикладной аналитики; значение методологии для оперирования дефектами прикладной аналитики; когнитивные предубеждения как источник дефектов прикладных аналитических продуктов; когнитивные уязвимости практика-аналитика.

Восьмая глава посвящена коллективно-производимой аналитике, аналитическим центрам, включает восемь параграфов: осведомленность в предметно-объектной области (доменная осведомленность) и превосходство в такой осведомленности; ситуационная осведомленность и превосходство в ситуационной осведомленности; общая оперативная картина в прикладной аналитике; аналитическая сложность аналитического подразделения; фабрики аналитики; ситуационно-аналитические центры.

Девятая глава посвящена профильным предметно-объектным областям (направлениям) прикладной аналитики, в том числе правовой аналитике, инженерной аналитике, бизнес-аналитике.

Каждый параграф в большинстве случаев дробится на подпараграфы, которые, в свою очередь, обладают большей самостоятельной ценностью. На круг (то есть на том) – сотни и сотни важнейших и сложных вопросов оказываются объяснены.

Учебник венчает заключение, подводя итоги.

Рецензируя эту работу, невозможно оставить без внимания тот аспект, что это одно из первых в стране изданий, проиллюстрированных с помощью технологий генеративного искусственного интеллекта.

Правда, некоторые изображения руковорны, но есть в работе иллюстрации, сгенерированные машиной под prompt-управлением И. В. Понкина. Автор оперирует сложными визуальными образами с мощным когнитивно-стимулирующим содержанием, на своем примере, помимо всего прочего, доказывая каноническое положение о ценности визуализации в прикладной аналитике.



Это очень важный момент, тем более важный, что живем мы в условиях повальной пространственности мемо-клипового мышления, и это надо учитывать при разработке учебников и программ.

Ледяные шары, вмороженные в ледяной же прозрачный куб (С. 37), – как образное отображение составного аналитического продукта; собранный деревянный пазл строгого куба, состоящего из сложных пространственных деталей, образно отображающих значение органической, интегративной целостности аналитического отчета (С. 429), серия иллюстраций, обыгрывающая сложные пространственные сочетания стальных шаров и стальных тросов (С. 35, 158, 600), сложные пространственные сочетания кубов (С. 34, 72, 622, 623, 630, 655, 668); «свеча, дающая не пламя, но исторгающая турбулентную струю воды» – как «образное отражение неадекватности и фантастичности, явной аномальности фиксируемых данных или полученного дефектного аналитического результата» (С. 146); «образное отображение горящего водяного льда (в условиях отсутствия химических хитростей)» (С. 222) и очень многое другое наверняка помогут визуализировать читающим основные моменты учебника.

Также, таким иллюстративным обеспечением двухтомника плюс нулевого тома И. В. Понкин достигает еще одной важной цели – расширения круга интересантов тематикой далеко за пределы узкого круга высококласных профи-аналитиков.

Из явных недостатков пятого издания первого тома (по прикладной аналитике) можно было бы указать на nepoзвoлитeльную малость объемов весьма востребованных тематических разделов – «Инженерная аналитика» (две страницы); «Бизнес-аналитика» (две страницы).

Еще одним недостатком пятого издания первого тома (равно как и второго в предыдущем, четвертом, издании) мы видим отсутствие контрольных заданий, задачников после глав. Хотя, возможно, учитывая масштабность работы, такой задачник, сборник заданий следует сделать отдельным томом.

По иллюстрированному введению в прикладную аналитику, тут мы бы, скорее, рекомендовали выпустить аналогичное иллюстрированное введение в научно-исследовательскую работу, что было бы логично, исходя из замысла двухтомника.

Однако говорить об «идеальности» – не лучший способ оценивания инструктивных работ в науке и прикладной аналитике, и оба издания – объективно выше всяких похвал.

В данном случае даже можно говорить о появлении в стране целого класса высокоинтеллектуальной аналитической литературы. Едва ли Игоря Понкина и его соавтора Алену Лаптеву можно считать родоначальниками или центральным элементом такой литературы (есть авторы поименнее и поплодовитее), но то, что «Методология научных исследований и прикладной аналитики» занимает по праву «лучшую полку» в этом объеме, – это бесспорно. Это более чем достойный вклад.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Куприяновский В. П. Учить и учиться науке // Право и государство: теория и практика. – 2022. – № 8. – С. 178–179. EDN: EFMMTU. DOI: 10.47643/1815-1337_2022_8_178.
2. Понкин И. В. Методология научных исследований и прикладной аналитики: Учебник. Изд. 5-е, дополн. и перераб. В 2 т. Т. 1: Прикладная аналитика (Мастерство и искусство аналитического мышления и аналитической работы) / Консорциум «Аналитика. Право. Цифра». – М.: Буки Веди, 2024. – 720 с. [Электронный ресурс]: https://moscou-ecole.ru/ponkin_methodology_5_1_practical-analytics/.
3. Понкин И. В. Иллюстрированное введение в прикладную аналитику. Приложение к учебнику «Методология научных исследований и прикладной аналитики» / Консорциум «Аналитика. Право. Цифра». – М.: Буки Веди, 2024. – 88 с. [Электронный ресурс]: <https://moscou-ecole.ru/2024/04/02/analyst-training/>.
4. Понкин И. В., Лаптева А. И. Методология научных исследований и прикладной аналитики: Учебник. Изд. 4-е, дополн. и перераб. В 2 т. Т. 2: Научные исследования / Консорциум «Аналитика. Право. Цифра». – М.: Буки Веди, 2023. – 640 с. [Электронный ресурс]: https://moscou-ecole.ru/2023/06/29/methodology_4-2_2023/.
5. Понкин И. В., Лаптева А. И. Методология научных исследований и прикладной аналитики: Учебник. Изд. 3-е, дополн. и перераб. / Консорциум «Аналитика. Право. Цифра». – М.: Буки Веди, 2022. – 754 с. [Электронный ресурс]: https://moscou-ecole.ru/2022/03/31/methodology_research_analytics_3_ed/.

Информация об авторе:

Куприяновский Василий Павлович – заместитель директора Научно-образовательного центра «Цифровые высокоскоростные транспортные системы» Передовой инженерной школы «Академия ВСМ» Российского университета транспорта, Москва, Россия, v.kupriyanovsky@rut.digital.

Статья поступила в редакцию 28.08.2024, принята к публикации 10.09.2024.

*Selected abstracts of Ph.D. theses submitted
at Russian transport universities*

*Полный текст в переводе на английский язык
публикуется во второй части данного выпуска.*

*English translation of the texts is published
in the second part of the issue*

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-16>

Борисов П. В. Методика оценки остаточного ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей тягового подвижного состава / Автореф. дис... канд. техн. наук. – СПб.: ПГУПС, 2024. – 15 с.

Применение независимых источников энергии на тяговом подвижном составе, таких как литий-ионные аккумуляторные накопители, дает возможность использования как гибридной технологии тяги, способствующей снижению нагрузки во время пиковых режимов работы дизель-генератора и водородных протонно-мембранных энергетических установок, так и полностью автономной от аккумуляторных батарей.

Применение альтернативных источников энергии, используемых для тягового подвижного состава на сети железных дорог Российской Федерации, получает все большее развитие. Задача по внедрению данных типов источников энергии на маневровых, пригородных и прочих локомотивах не решена в полном объеме, так как существует проблема ограниченного ресурса аккумуляторного накопителя. Тяговый подвижной состав, оборудованный аккумуляторным накопителем в качестве основного, требует ограниченных режимов работы.

Повышение эффективности работы системы «дизель-генератор – накопитель энергии» позволяет увеличить срок службы, а также снизить затраты на преждевременную замену или внеплановый ремонт дизель-генератора. Этот факт является залогом успешной реализации планов по освоению маневровых локомотивов серии ТЭМ9Н и ТЭМ5Х, а так же перехода маневровой тяги на автономную за счет использования локомотивов ЭМКА2.

Изучены причины, влияющие на снижение ресурса литий-ионных аккумуляторных батарей тягового подвижного состава (ЛИАБ ТПС), проявляющиеся в снижении общей емкости.

Исследована схема замещения, относящаяся к ЛИАБ ТПС, и определены ее параметры с последующей верификацией на модели со значениями, полученными в результате эксперимента.

Исследованы характеристики внутреннего сопротивления ЛИАБ ТПС, пригодной к эксплуатации, получена взаимосвязь между увеличением величины полного сопротивления Z и ее ресурсом. Определены критерии отбраковки ЛИАБ, находящихся в эксплуатации, по параметрам схемы замещения ЛИАБ.

Разработаны предложения по организации контроля ресурса ЛИАБ ТПС средствами функциональной диагностики в условиях текущей эксплуатации, которые позволят осуществлять контроль текущего состояния, а также прогнозировать снижение ресурса и ЛИАБ без осуществления технического обслуживания и текущего ремонта тягового накопителя.

По разработанным предложениям контроля ресурса ЛИАБ ТПС построены алгоритмы ПО по диагностике накопителя ЛИАБ для ТПС.

Разработано программное обеспечение для системы управления преобразователем энергии, работающим с ЛИАБ ТПС, на которое получено авторское свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023681901.

Произведен тяговый расчет экспериментального локомотива для маневровой работы, оборудованного ЛИАБ. По заданному режиму работы ТПС на сортировочной горке определена емкость ЛИАБ. Для полученного тягового накопителя определен срок эксплуатации, обоснованный экспериментальными исследованиями.

В качестве рекомендаций и перспектив дальнейшего развития в данном направлении может быть предложена отработка предложенной методики на разных видах накопителей электрической энергии, а также разработка аппаратного бортового автоматизированного диагностического комплекса, внедренного в тяговый накопитель, осуществляющего сбор, хранение и анализ информации



2.9.3 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация.

Работа выполнена и защищена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I.

Ковалев В. А. Повышение эффективности взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ / Автореф. дис... канд. техн. наук. – Хабаровск: ДВГУПС, 2024. – 24 с.

В рамках реализации Транспортной стратегии Российской Федерации поставлена цель повышения провозной способности Восточного полигона железных дорог.

Важнейшей задачей является ликвидация «узких мест» на транспортной сети железных дорог, которые ограничивают увеличение скорости и весовых норм поездов. В качестве одного из механизмов устранения «узких мест» Стратегия предусматривает реконструкцию и модернизацию систем тягового электроснабжения.

В диссертационной работе рассмотрены вопросы повышения эффективности взаимодействия систем внешнего (далее – СВЭ) и тягового (далее – СТЭ) электроснабжения переменного тока 25 кВ в целях выполнения задач, сформулированных программами стратегического развития железных дорог.

Выполнен анализ показателей взаимодействия систем внешнего и тягового электроснабжения переменного тока 25 кВ на примере СТЭ ДВЖД. Присоединение тяговых подстанций в СТЭ переменного тока 25 кВ по «подпитывающей» схеме создает «узкое место» повышения веса поездов и снижения интервалов попутного следования.

Математическая модель расчета распределения токов тяговых нагрузок ЭПС в обмотках тяговых трансформаторов и фазах ЛЭП системы внешнего электроснабжения уточнена разработанными в диссертационном исследовании временными входными сопротивлениями узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП.

Разработаны алгоритм и АРМ определения временных входных и взаимных сопротивлений узлов присоединения тяговых подстанций к ЛЭП СВЭ.

Разработана база данных ЛЭП, силовых трансформаторов и автотрансформаторов подстанций СВЭ, питающей СТЭ ДВЖД.

Разработан алгоритм определения количества интервалов времени, выбора схем пита-

ния прогнозных тяговых нагрузок в расчетном периоде с учетом минимизации дисперсии и рационального расхода ресурса коммутационных аппаратов и устройств регулирования напряжения тяговых подстанций. Реализация алгоритма выполнена программой для ЭВМ.

Полученные результаты доказывают, что информационное моделирование нормализации схем питания тяговых нагрузок и присоединения тяговых подстанций к ЛЭП и тяговой сети повышает эффективность взаимодействия систем тягового и внешнего электроснабжения.

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация.

Работа выполнена и защищена в Дальневосточном государственном университете путей сообщения.

Полякова Л. А. Мониторинг размывов грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний / Автореф. дис... канд. техн. наук. – Новосибирск: СГУПС, 2024. – 24 с.

Безопасность мостовых сооружений в процессе эксплуатации должна обеспечиваться посредством проведения периодических осмотров, контрольных проверок и мониторинга состояния конструкций. При осуществлении работ по обследованию конструкций оценивают эксплуатационную надежность транспортных сооружений и дают рекомендации по устранению выявленных дефектов. Дефекты, влияющие на безопасность сооружения, могут образовываться в местах, труднодоступных для проведения осмотров (например, в подводной части опор и в подмостовом русле). Одним из таких дефектов является размыв грунта у русловых опор моста.

При проектировании мостового перехода производят расчет максимальной глубины размыва грунта у опоры и определяют необходимое заглубление подошвы фундамента опоры в грунт. Но этих мер зачастую оказывается недостаточно для безопасной эксплуатации моста. Это связано в первую очередь с тем, что расчетные характеристики водного потока за период эксплуатации сооружения могут существенно измениться по сравнению со значениями, принятыми на момент проектирования. Эти изменения связаны с переменами климата, а также с изначально заложенной расчетом возможной вероятностью

превышения характеристик водотока. Также в практике встречаются случаи, когда у опоры происходит размыв скального основания, изначально считающегося неразмываемым. Это обусловлено особенностью конкретного скального грунта, который при нарушении своей природной структуры (сооружении фундамента опор) разрушается до грунта, подверженного размывам. Исходя из этого, для обеспечения надежности мостового сооружения необходим периодический мониторинг размывов грунта у опор.

Актуальность исследования обусловлена отсутствием научно-обоснованного способа оперативной диагностики и мониторинга размывов грунта у русловых опор. А тот факт, что при развитии размыва изменяется свободная длина опоры, позволил выдвинуть гипотезу о зависимости частоты собственных колебаний природно-техногенной системы, состоящей из опоры, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений, от величины размыва грунта у опоры.

Проведены натурные измерения частот собственных колебаний природно-техногенных систем, состоящих из опор, грунта основания и опирающихся на опоры пролетных строений, при различном конструктивном исполнении элементов и фактическом уровне грунта у опор. В результате этого установлены экспериментальные качественные и количественные зависимости частот собственных колебаний природно-техногенных систем различного конструктивного исполнения от глубины размыва грунта у опор.

Обоснованы расчетные допущения при определении частоты собственных колебаний опоры с учетом ее совместной работы с опирающимися на нее пролетными строениями и грунтом основания. Тем самым уточнена математическая модель для определения частот собственных колебаний природно-техногенных систем при различной глубине заложения фундамента, описывающая взаимодействие опоры и опирающихся на нее пролетных строений, путем учета особенности работы опорных частей при свободных колебаниях. Получены расчетные зависимости частот собственных колебаний природно-техногенных систем от глубины размыва грунта у опор. Соответствие принятых расчетных предпосылок фактической работе конструкции подтверждено сопоставлением

получаемых частот с результатами натурных измерений для 35 эксплуатируемых опор.

Разработан алгоритм мониторинга глубины размыва грунта у опор железнодорожных мостов по частотам собственных колебаний, позволяющий своевременно выявлять размывы опор и контролировать их глубину.

Перспективными являются дальнейшие исследования динамической работы различных природно-техногенных систем с учетом конструктивных особенностей мостового сооружения и массы воды, вовлекаемой в колебательный процесс.

2.1.8 – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки).

Работа выполнена и защищена в Сибирском государственном университете путей сообщения.

Уманец В. В. Управление рисками в логистической системе грузовых железнодорожных перевозок / Автореф. дис... канд. техн. наук. – СПб.: ПГУПС, 2024. – 17 с.

Целью исследования является разработка методических положений управления рисками грузовых железнодорожных перевозок, возникающих в логистических транспортных системах в условиях дефицита провозной способности железнодорожной инфраструктуры и связанных с нарушением сроков доставки грузов, отказами технических средств (ОТС) и действиями сторонних организаций.

Обоснована необходимость синхронизации системы управления рисками с методами анализа и прогнозирования железнодорожных грузоперевозок, особенно на ключевых направлениях. Выполнена формализация транспортно-логистических рисков, возникающих под влиянием множества факторов, в том числе, ограничений инвестиционного развития инфраструктуры, тарифных ограничений и роста эксплуатационных расходов, связанных с ее содержанием и ремонтом.

Доказано, что существующая система анализа грузовых перевозок не учитывает в полной мере проблемы состояния и развития железнодорожной инфраструктуры, что не позволяет оперативно и гибко реагировать на изменение структуры потоков грузов и динамики перевозок. В качестве решения проблемы предложен алгоритм прогнозирования



объемов перевозки грузов, позволяющий уточнять изменения в объемах и структуре грузов в соответствии с возможностями пропускной способности инфраструктуры.

Разработана концепция анализа грузовых железнодорожных перевозок с учетом рисков инфраструктурных ограничений. Дополнено понятие рисков ограничения провозной способности железнодорожной инфраструктуры.

Методом семантического моделирования проведена систематизация, структурирование и ранжирование рисков нарушения сроков доставки грузов и владельцев рисков, выполнена количественная оценка рисков по источникам их генерации. Показано, что предложенный расчет позволяет повысить достоверность оценки рисков ограничения провозной способности железнодорожной

инфраструктуры с учетом частоты их возникновения и значимости влияния на сроки доставки грузов.

Разработана и апробирована методика управления рисками провозной способности железнодорожной инфраструктуры на основе семантического моделирования. Разработан программный продукт на языке программирования JAVA, применение которого может быть полезным в системе управления рисками логистических транспортных систем, построенных на других видах транспорта.

2.9.9. – *Логистические транспортные системы.*

Работа выполнена и защищена в Петербургском государственном университете путей сообщения Императора Александра I. ●

НОВЫЕ КНИГИ О ТРАНСПОРТЕ

Список на английском языке публикуется во второй части данного выпуска

The list of titles in English is published in the second part of the issue

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-17>

Ашихмин С. А., Ашихмина Е. А. Устройство автомобилей: Учебник. – 2-е изд., стер. – М.: Академия, 2024. – 318 с. ISBN 978-5-0054-1682-7.

Гречаник А. В., Замуховский А. В., Семёнов Е. В. Проектирование одиночного обыкновенного стрелочного перевода: Учебно-метод. пособие. – М.: Перо, 2024. – 55 с. ISBN 978-5-00244-214-0.

Грунтович Ник. В., Грунтович Над. В. Техническая диагностика электрооборудования: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 253 с. ISBN 978-5-16-017836-3.

Гулевич А. Н., Магковский В. В., Сошкин П. А. Взрывопожаробезопасность корабля: Учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 223 с. ISBN 978-5-16-018739-6.

Гумеров А. Ф., Схиртладзе А. Г., Гречишников В. А. [и др.] Управление качеством в машиностроении: Учеб. пособие. – Старый Оскол: ТНТ, 2024. – 167 с. ISBN 978-5-94178-172-0.

Зинцов А. Н. Эксплуатация автомобилей и тракторов: контрольно-диагностические и регулировочные работы. Практикум: Учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 276 с. ISBN 978-5-16-017980-3.

Исаев Р. А. Управление операционными рисками: надёжность бизнес-процессов и ИТ-систем: Практ. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 152 с. ISBN 978-5-16-019573-5.

Катин В. Д., Косыгин В. Ю., Журавлев А. А. Исследование шума горелок и других устройств на объектах и предприятиях нефтепереработки и теплоэнергетики и разработка методов его снижения: Монография. –

Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2024. – 161 с. ISBN 978-5-7389-3824-5.

Климова Г. Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение: Учеб. пособие. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2024. – 179 с. ISBN 978-5-534-18321-4.

Кротенко Т. Ю., Сундукова Г. М. Инженерно-экономическое образование: трансформация и развитие современного пространства подготовки управленцев: Монография. – Курск: Университетская книга, 2024. – 306 с. ISBN 978-5-907857-81-0.

Кузнецов В. В., Польский Е. В., Печенка С. Н. Эксплуатация судовых котельных и паропроизводящих установок: Учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 134 с. ISBN 978-5-16-017930-8.

Романов Э. Н. Судовые холодильные установки и их эксплуатация: справочные материалы: Учебно-метод. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 226 с. ISBN 978-5-16-018446-3.

Секириков В. Е. Охрана труда на предприятиях автотранспорта: Учебник. – 5-е изд., стер. – М.: Академия, 2024. – 203 с. ISBN 978-5-0054-1712-1.

Смирнов А. Ю. Электромеханика. Основы теории и вычислительный анализ электрических машин: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ИНФРА-М, 2024. – 348 с. ISBN 978-5-16-016661-2 (print).

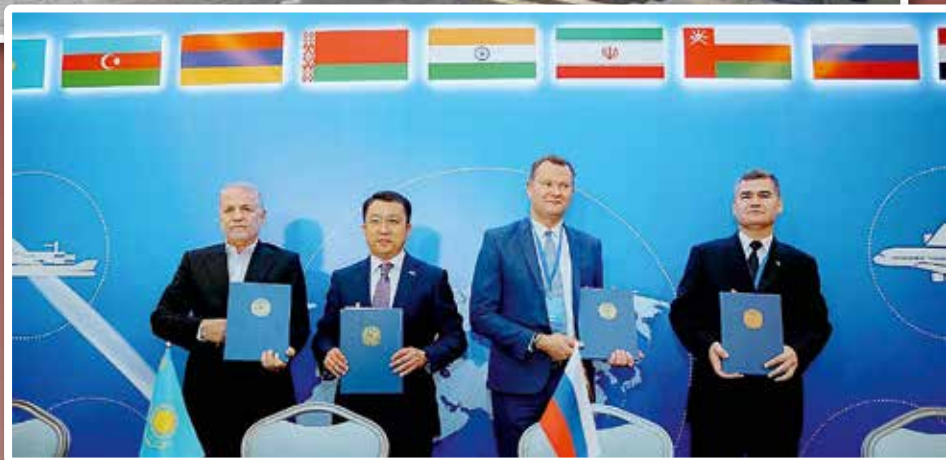
Соколов Ю. И., Лавров И. М., Ишханян М. В. Основы экономики транспортного комплекса: Учеб. пособие. – М.: РУТ (МИИТ), 2024. – 165 с. ISBN 978-5-7876-0291-3.

Стоянова М. В. Исследования технологий и рынков: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. – 125 с. ISBN 978-5-7038-6189-9.

Сяглова Ю. В., Маслевич Т. П., Сафронова Н. Б. Управление бизнесом в условиях цифровой экономики: Учебник. – М.: Дашков и К°, 2024. – 319 с. ISBN 978-5-394-05804-2.

Фридман А. М. Финансы организаций. Практикум: Учеб. пособие. – М.: РИОР: ИНФРА-М, 2024. – 249 с. ISBN 978-5-369-01950-4.

Составила Н. Олейник ●



НОВОСТИ РОССИЙСКОГО ТРАНСПОРТА

11 июля 2024 года Председатель Правительства Российской Федерации Михаил Мишустин подписал распоряжение о присвоении **премии Правительства в области транспортной науки и техники имени Владимира Николаевича Образцова.**

Премия в 2024 году вручат впервые, она будет приурочена ко Дню работника транспорта, который отмечается 20 ноября. Размер премии – 1 млн рублей, вручается она в трех номинациях. Премии удостоены первый заместитель генерального директора по технической политике ООО «Уральские локомотивы» Виталий Брексон, директор Проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства – филиала ОАО «Российские железные дороги» Юрий Попов, директор ФГУП «Всероссийский научно-исследо-

вательский институт гигиены транспорта» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАН Михаил Вильк.

19 Июля 2024 года в Актау статс-секретарь – заместитель Министра транспорта Дмитрий Зверев принял участие в **I Транспортном торгово-экспортном форуме «Север – Юг»** и выступил на пленарной сессии с докладом о трендах мультимодальных перевозок. Представители России, Казахстана, Ирана и Туркменистана подписали «дорожную карту» по развитию МТК «Север – Юг» на 2024–2025 годы. Реализация документа позволит к 2027 году увеличить пропускную способность восточной ветки коридора.



24 июля 2024 года сообщено, что Минтранс России планирует запустить **проект по реализации интегрированной системы пропуска через государственную границу**, информационную систему, предназначенную для обеспечения объективного мониторинга времени прохождения государственной границы транспортными средствами и эффективной обработки данных в рамках проведения процедур государственного контроля. Полностью отечественная разработка позволит обеспечить автоматизированный сбор и обработку данных с систем радиационного и весогабаритного контроля, инспекционно-досмотрового комплекса, систем видеоаналитики, автодо-

смotra, электронной очереди и иных средств контроля.

1 августа стартует эксперимент по созданию **Национальной цифровой транспортно-логистической платформы (НЦТЛП)**. Эксперимент продлится с 1 августа 2024 года по 1 июня 2025 года на добровольной основе. В ходе эксперимента планируется апробировать технологии, связанные с предоставлением данных для ведомств от бизнеса в целях упрощения перевозок и полного отказа от бумажных документов.

29 августа 2024 года сообщено об открытии **в международном аэропорту Томска нового аэровокзала для внутренних авиалиний**. ●

По материалам пресс-центра Министерства транспорта Российской Федерации: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11365>; <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11366>; <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11358>; <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11417>; <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11376>.

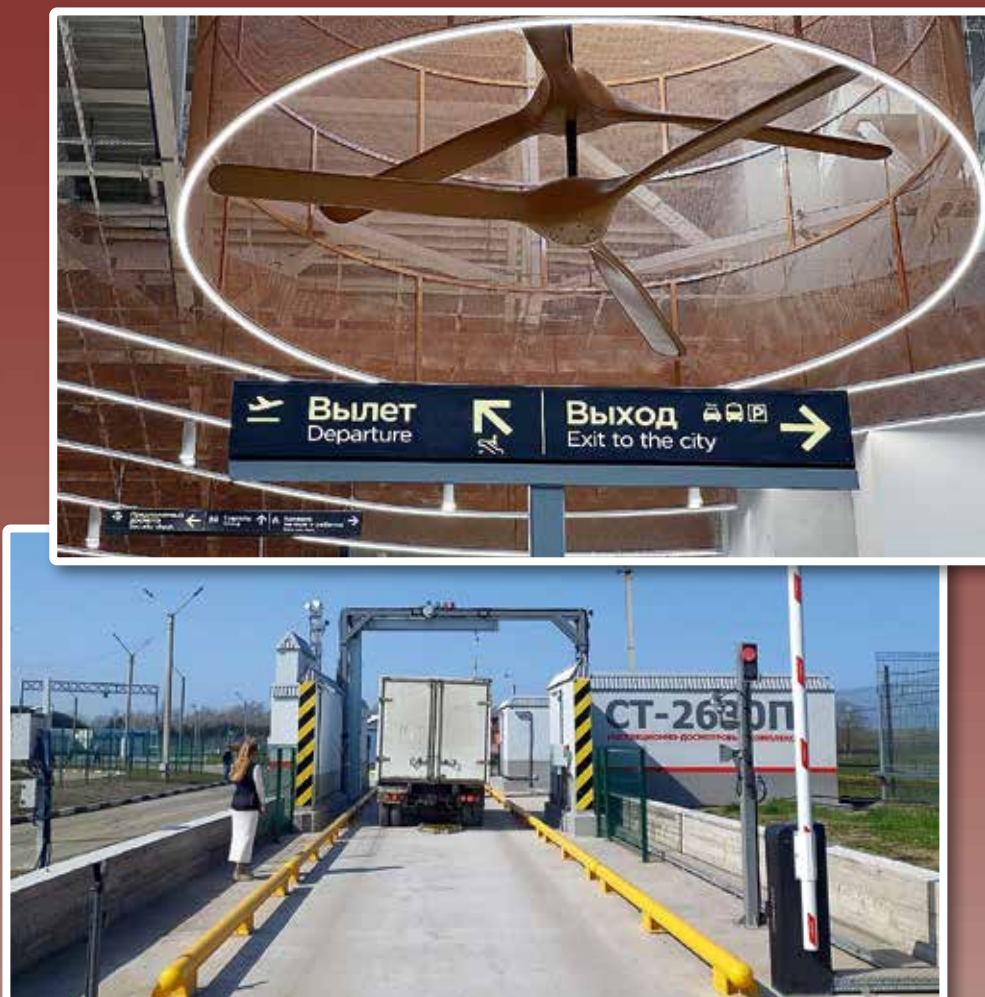


RUSSIAN TRANSPORT NEWS

On July 11, 2024, the Chairman of the Government of the Russian Federation Mikhail Mishustin signed a decree awarding the **Government Prize in the field of transport science and technology named after Vladimir Nikolaevich Obratsov**. The Prize in 2024 will be awarded for the first time, the award ceremony will be timed to coincide with the Day of the Transport Employee, which is celebrated on November 20. The amount of the Prize is 1 million rubles, it is awarded in three categories. The Prize has been awarded to Vitaly Brekson, First Deputy General Director for Technical Policy of Ural

Locomotives LLC, Yuri Popov, Director of the Design Bureau of Locomotive Facilities, a branch of Russian Railways, and Mikhail Vilks, Director of the All-Russian Research Institute of Transport Hygiene of the Federal Service for the Oversight of Consumer Protection and Welfare of the Russian Federation, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences.

On July 19, 2024, in Aktau, State Secretary – Deputy Minister of Transport Dmitry Zverev took part in the **First North-South Transport Trade and Export Forum**



and spoke at the plenary session on trends in multimodal transportation. Representatives of Russia, Kazakhstan, Iran and Turkmenistan signed a roadmap for the development of the North-South ITC for 2024–2025.

On July 24, 2024, it was reported that the Ministry of Transport of Russia planned to launch **a project for the implementation of an integrated system for crossing the state border**, an information system designed to ensure objective monitoring of the time of crossing the state border by vehicles and effective data processing as part of state control procedures. A completely domestic development will ensure the automated collection and processing of data from radiation and weight

and size control systems, inspection complex, video analytics systems, vehicle check, electronic queue and other control tools.

August 1 saw the start of a pilot project to create **National Digital Transport and Logistics Platform**. The experiment will last from August 1, 2024 to June 1, 2025 it is planned to test technologies related to the provision of data from business to governmental departments to simplify transportation and completely abandon paper documents.

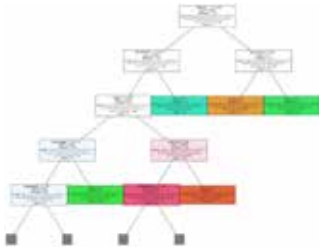
On August 29, 2024, it was announced that **a new air terminal for domestic flights had been inaugurated at Tomsk International Airport**. ●

Based on the news released by the media centre of the Ministry of Transport of the Russian Federation: <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11365>; <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11366>; <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11358>; <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11417>; <https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11376>.



RAILWAY CONSTRUCTION 134

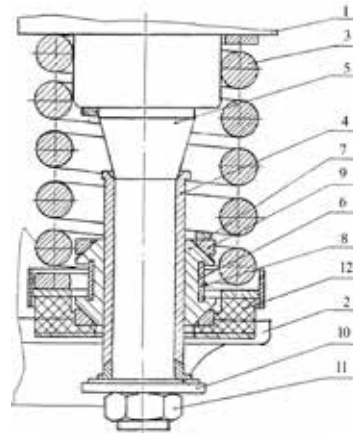
Simulation and modelling of operation of a ballast prism.



STATIONS 141

Digital scheduling of train processing operations.

SCIENCE AND ENGINEERING



RAIL TRANSPORT 149

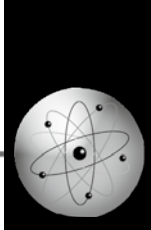
Spring suspension of metro coaches.

AIRPORTS 153

Distributed data registry.

BRIDGES 158

Methods to determine service life of bridge superstructure.



ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-1>

Modelling the Operation of a Ballast Prism with Under-Sleeper Pads



Egor O. DYLEV



Evgeny S. ASHPIZ

Egor O. Dylev¹, Evgeny S. Ashpiz²^{1,2}Russian University of Transport, Moscow, Russia.¹ ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0665-822X>;

Russian Science Citation Index SPIN-code: 6475-9848;

Russian Science Citation Index AuthorID: 1157251.

² ORCID: 0000-0003-1334-2117; Russian ScienceCitation Index SPIN-code: 5412-7662; Russian Science
Citation Index AuthorID: 169354.✉ ¹ dylev.egor@mail.ru.**ABSTRACT**

An important condition for operation of extra heavy-duty lines is to ensure the stability of the track geometry, including in the vertical plane, which largely depends on the stability of the sleeper base and on the absence of residual deformation of the ballast layer.

The article refers to the analysis of the results of a study on reducing residual deformations of the ballast layer using sleeper pads. The objective of the work is to assess their impact on the operation of the ballast prism during the stabilisation period and

the period of its normal operation. The laboratory tests allowed obtaining a stamp settlement graph, determining the intensity of its settlement, measuring the contact area of the stamp sole with the ballast, calculating contact stresses, constructing a graph of the change in the elastic modulus of the model.

The results of the study have revealed that sleeper pads help to reduce residual deformations of the ballast layer during its stabilisation period and the intensity of settlement during the main period of its operation.

Keywords: railway track, sleeper pads, track elasticity modulus, ballast layer, rail settlement, residual ballast deformations.

For citation: Dylev, E. O., Ashpiz, E. S. Modelling the Operation of a Ballast Prism with Under-Sleeper Pads. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 134–140. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-1>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

The stability of the track geometry is an important condition for the safe operation of railways with intensive traffic and large volumes of cargo transportation. This applies to an even greater extent to lines with particularly high cargo traffic volumes¹, the length of which, for example, on the network of JSC Russian Railways is currently 16 thousand km [1].

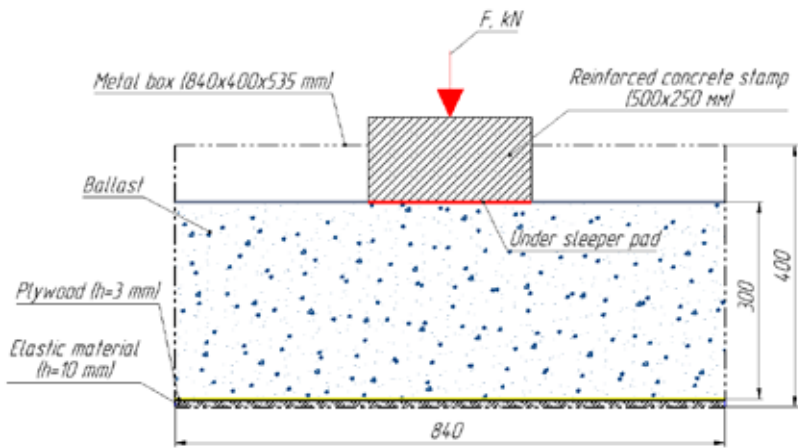
Several works of researchers of the Railway Research Institute of JSC Russian Railways [2–5] were devoted in the second half of 20th century to the studies of the accumulation of residual deformations in the ballast layer, that helped to shape the basic understanding of the operation of this element of the track structure. Considering the operation of the ballast layer of the railway track, S. N. Popov pointed out that to ensure long-term stability of the sleeper base on lines with high cargo traffic volumes, it is necessary to have a track design in which the ballast layer along the entire length of the track would operate with uniform accumulation of residual deformations [2]. Studying the nature of accumulation of residual deformations of the ballast layer during its life cycle, he identified four characteristic periods, which he described as follows: during the period 1 (the stabilisation period), there is an intensive accumulation of residual deformations due to the realigning (repackaging) of grains and the rounding of their

sharp edges, both processes decreasing sharply towards the end of the period. During the period 2 (the normal operation period), the accumulation of residual deformation becomes minimal. The period 3 is characterised by an increase in the accumulation of residual deformations, which is associated with the contamination of the crushed stone by the end of its service life. During period 4, there is an excessively intensive accumulation of settlement, which occurs due to failure to perform timely repairs to the track.

V. I. Lysyuk considered that the main reason for the accumulation of residual deformations in the ballast during operation was due to the dynamic impact of trains on the track [3], which is stronger, the higher is the rigidity of the superstructure. An example of an increase in track rigidity is the transition from wooden sleepers to reinforced concrete ones. This change in design resulted in an increase in the dynamic impact of trains on the track and, accordingly, in a growing intensity of accumulation of residual deformations in the ballast layer, which was noted in the work of V. F. Fedulov [4]. The greatest problems in this case arise with dynamic impact in the area of the rail joint. To solve them, the work [5] proposed to achieve a reduction in residual deformations of the ballast by installing an elastic connection along the lower support surface of the reinforced concrete sleeper, which will improve the conditions of contact of crushed stone particles with the sole of the sleeper, reduce its crushability and abrasion.

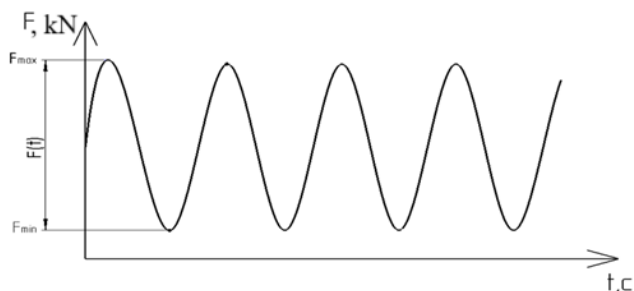
In some countries, on a few sections, stress reduction in the ballast layer is achieved by using under-sleeper pads (hereinafter referred to as USP) [6]. In Russia, studies of the efficiency of

¹ SP [Code of rules] 119.13330.2012. 1520 mm gauge railways. Updated version of SNiP 32–01–95 [Construction norms and rules] Railways with 1520 mm track. [In Russian]. [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/1200095541?ysclid=m7endujtqq310261972>. Last accessed 21.08.2024.



Pic. 1. Scheme of the laboratory model structure [performed by the authors].





Pic. 2. Scheme of the laboratory model structure [performed by the authors].

USPs started in the middle of 20th century [5; 7; 8], but they were mainly aimed at ensuring track stability in the areas of rail joints. Namely, the work of V. N. Kaplin [9] confirmed the technical and economic efficiency of using USPs when straightening the track at joints.

At the current stage of increasing train loads on the track, it is necessary to study the efficiency of using USPs outside the area of rail joints, considering a possibility of reducing the accumulation of deformations in the conditions of a continuous track, and that is the *objective* of the study.

Based on the above characteristics of four periods of operation of the ballast prism, formulated by S. N. Popov, it can be assumed that USPs, due to the reduction of contact stresses, should reduce the settlement of ballast layer during periods 1 and 2 of its operation, and will not have an effect on periods 3 and 4, since the main influence on the increase in settlement at this time is its contamination.

To confirm the presented hypothesis, it was decided to conduct a laboratory experiment with the purpose to determine the effect of USPs on periods 1 and 2 of the ballast layer operation.

RESULTS

Test conditions

The modelling of the ballast layer operation was performed as a modelling in two-dimensional space, where the plane of modelling is assumed to be the plane along the track in the under-rail zone. The possibility of conducting such an experiment was confirmed in the work [10] when studying the deformation properties of contaminated ballast.

The model diagram is shown in Pic. 1.

The model was assembled in a metal box with the following dimensions: along the track axis – 850 mm (the minimum dimension to eliminate the influence of boundary conditions), across the

track axis – 535 mm (the smallest dimension for crushed stone testing should exceed the maximum size of the crushed stone particles by at least 5 times [11]), height – 400 mm.

A 10 mm thick elastic mat was placed at the base of the box, which modelled the main platform of the roadbed (hereinafter – MPRB). To eliminate local deformations, 3 mm thick plywood was placed upon the elastic layer. This design made it possible to achieve a deformation modulus of MPRB of 80 MPa. The thickness of the ballast layer was 30 cm.

At the next stage, granite crushed stone type 2 was laid layer by layer, the grain composition of which complied with GOST [State standard] 7392². The layer thickness was 100 mm. Each layer was compacted using a wooden stamp measuring 830 x 525 mm. The first two layers were subject to 10 thousand load cycles, the third layer – to 500 thousand load cycles. The graph of load application is shown in Pic. 2. The load application frequency was 8 Hz. This compaction mode allows achieving the best compaction [12].

After compaction, a reinforced concrete stamp was installed. To ensure real contact between the sleeper and the ballast, the stamp was cut out of the middle part of the sleeper of the Sh3-Д4x10 subtype. A photo of the assembled model is shown in Pic. 3.

During the experiment itself, the model was subjected to the load in the same mode as during compaction, as it is shown in Pic. 2. The maximum force allows achieving permissible stresses under the sleeper sole caused by the wagons equal to 325 kPa. This stress value is established in the Methodology for assessing the

² GOST [State standard] 7392–2014. Crushed stone of rocks for railway ballast. Specifications. [In Russian]. [Electronic resource]: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293762/4293762301.pdf?ysclid=m872wmf7pk430161462>. Last accessed 21.08.2024.



Pic. 3. Assembled laboratory model [photo taken by the authors].



Pic. 4. Appearance of soft-type USP after testing [photo taken by the authors].

impact of rolling stock on the track based on conditions of ensuring dependability³ (hereinafter referred to as the Methodology).

The number of cycles in the experiment was 2 million.

The load impact frequency was 8 Hz. The adopted impact frequency was based on the following assumed parameters: a bogie base of 1850 mm and an average speed through the network of 55 km/h (15,28 m/s).

Three experiments were performed, which had differences in the area of the contact between the stamp sole and the ballast:

- Model No. 1 – without USP.
- Model No. 2 – with USP of a soft type.
- Model No. 3 – with USP of an intermediate type.

The assembly of each of the presented models was carried out according to the description presented above.

³ Methodology for assessing the impact of rolling stock on the track based on conditions of ensuring dependability, approved by the order of JSC Russian Railways, dated 22.12.2017, No. 2706r. [In Russian]. [Electronic resource]: https://megaorm.ru/mega_doc/norm/metodika/0/metodika_otsenki_vozdeystviya_podvizhnogo_sostava_na_put_po.html. Last accessed 27.08.2024.

USPs were made of polyolefin material, 10 mm thick and with a distributed static modulus of elasticity of 0,14 N/mm³ (soft type) and 0,24 N/mm³ (intermediate type).

USP types comply with the specifications 02.2020 adopted by Central infrastructure direction of the JSC Russian Railways.

RESULTS OF THE LABORATORY EXPERIMENT

After the completion of the experiment, a visual inspection of the condition of USP was carried out. It is worth noting that, after conducting cyclic tests under a load that causes the maximum permissible stresses under the sleeper sole, there were no through breakdowns or cracks on the USPs. Pics. 4 and 5 show photos of USP after the tests.

Pic. 6 shows a graph of the stamp settlement regarding three models, that evidence that the ballast settlement at the end of the first period of its operation decreased in the models with USP by approximately two times.

The stamp level marks at the end of the first period of operation and at the end of the experiment were listed in Table 1 to assess the efficiency of using the USP.





Pic. 5. Appearance of intermediate-type USP after testing [photo taken by the authors].

Table 1

Intensity of stamp settlement [performed by the authors]

Model	The value of settlement after the end of the first period (per 100 thousand cycles), mm	Stamp settlement after 2 million cycles, mm	Intensity of settlement during the second period, mm/mln of cycles
Without USP	7,70	9,75	1,03
With intermediate-type USP	4,28	6,38	1,00
With soft-type USP	3,22	5,05	0,92

The analysis of the results shown in Table 1 reveals that the use of intermediate-type USP allowed to reduce the stamp settlement at the end of the first period of the ballast prism operation by 44 %, and the use of the soft-type USP – by 58 %. It should also be noted that the use of USPs led to a decrease in the intensity of the stamp settlement during the second period of the ballast prism operation. Thus, intermediate-type USPs reduced the intensity by 3 %, and soft-type USPs – by 11 %.

No differences were found in the change in the grain composition of crushed stone between three models after the experiment (Table 2). This result can be explained by the consequence of the application of the ballast compaction before

the experiment itself, which led to the formation of a fine fraction at the preparatory stage, due to the fragments of calved sharp edges of crushed stone’s grains. As a result, it can be concluded that USPs affect the state of crushed stone by reducing the number of fragments of calved sharp edges, which is obtained due to the distribution of stresses over a larger area.

To determine the contact stresses, the areas of contact between the crushed stone’s grains and the lower surface of the sleeper were measured in the ballast using the raster method. The values of the areas of contact and contact stresses are shown in Table 3.

The result showed that when using under-sleeper pads, the area of contact of the crushed

Table 2

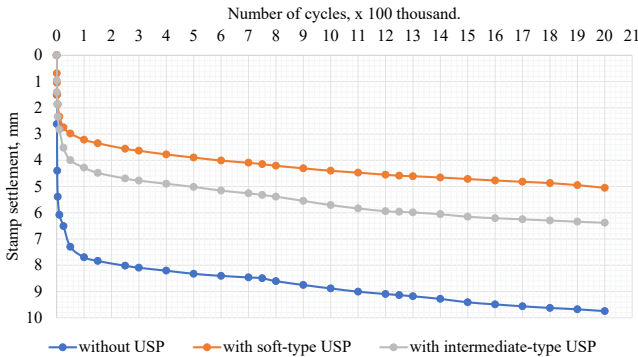
Change in grain size structure of crushed stone [performed by the authors]

Sieve opening, mm	Before testing		After testing					
			Without USP		With soft-type USP		With intermediate-type USP	
	%	kg	%	kg	%	kg	%	kg
60	1,6	4	1,6	4	1,6	4	1,6	4
40	73,4	183,5	72,9	182,3	72,5	181,2	72,9	182,3
25	25	62,5	25	62,4	25,5	63,7	24,9	62,3
from 0,01 to 25	-	-	0,5	1,3	0,5	1,2	0,5	1,4
Total	100	250	100	250	100	250	100	250

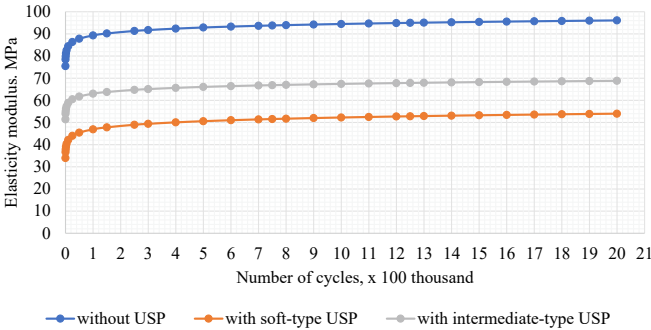
Table 3

Area of contact area of the stamp sole with the ballast [performed by the authors]

Parameter	Without USP	With soft-type USP	With intermediate-type USP
Area of contact of the stamp sole with the ballast, %	9	20	20
Contact stress, MPa	3,61	1,63	1,63



Pic. 6. Stamp settlement graphs [performed by the authors].



Pic. 7. Change in the elastic modulus of the model [performed by the authors].

stone with the sleeper increased by 2,20 times, and therefore, the contact stresses dropped by the same amount. Accordingly, this reduction in stresses will entail a decrease in the number of fragments of calved sharp edges of crushed stone's grains, their rearrangement, and, consequently, will increase the stability of the railway track in the vertical plane.

In addition to the data provided on the accumulation of residual settlement, the change in the elastic modulus of the track during the experiment was determined for each model using formula (1):

$$U = \frac{\alpha \omega C}{l}, \tag{1}$$

where α – sleeper bending rate, i.e. the ratio of the average settlement of a sleeper to its settlement under the rail;

ω – area of half-sleeper;

C – sleeper's lower surface rate;

l – distance between sleepers.

In turn, the sleeper's lower surface rate C was calculated using formula (2):

$$C = \frac{\Delta F}{\Delta y \omega}, \tag{2}$$

where ΔF – average increment in load on half-sleeper;

Δy – corresponding displacement increment.

In formula (1), the bending rate α for the stamp was taken to be equal to 1, the area of the half-sleeper ω was taken to be equal to 0,125 m (the area of the stamp base), and the distance between the sleepers corresponds to the distribution of 1840 pcs/km.

In formula (2), ΔF is the difference between the maximum and minimum load applied to the stamp, and the value Δy was obtained experimentally and is the difference in the displacement of the stamp at the minimum and maximum values of the applied force.

Pic. 7 shows a graph of the change in the elastic modulus of the track for each model,



calculated using formula (1) throughout the experiment.

The graph shows that the model without a UPS has an elastic modulus close to 100 MPa, which is consistent with the data given in Methodology² for a railway track laid on reinforced concrete sleepers. Analysing the graph, it is possible to state that the use of soft-type pads reduces the elastic modulus of the track almost two times and brings it closer to the track laid on wooden sleepers, which is considered optimal for the interaction of the track and rolling stock.

CONCLUSIONS

The experiment confirmed the previously stated hypothesis about the reduction of residual settlement of the ballast layer when using the soft-type USP. At the same time, after 2 million loading cycles, the value of the residual settlement of the ballast layer decreased by 1,5 times with the intermediate-type USP and by 1,9 times with the soft-type USP.

The area of contact between the sole of the reinforced concrete stamp and the crushed stone when using the soft-type USP increased by about 2 times, which reduced the contact stresses on the crushed stone by the same ratio and, accordingly, reduced the risk of its abrasion.

The value of the elastic modulus of the track in the experiment for the model without the USP was obtained close to the value of a similar modulus adopted in the calculations according to Method², which indicates the correctness of the experimental results.

The elastic modulus of the track when using the soft-type USP decreased to the values of the elastic modulus of the track laid on wooden sleepers, which is considered optimal for the interaction of the track and rolling stock.

REFERENCES

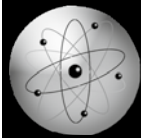
1. Korenkov, D. A., Ivannikov, M. A., Zagitov, E. D. Requirements for promising infrastructure elements, repair and maintenance [Trebovaniya k perspektivnym elementam infrastruktury, remontu i obsluzhivaniyu]. [In Russian]. Railway Track and Facilities, 2023, Iss. 1, pp. 2–4. EDN: ALXGAR.
2. Popov, S. N. Ballast layer of a railway track [Ballastniy sloj zheleznodorozhnogo puti]. [In Russian]. Moscow, Transport publ., 1965, 183 p.
3. Lysyuk, V. S., Sazonov, V. N., Bashkatova, L. V. Durable and reliable railway track [Prochniy i nadezhniy zheleznodorozhniy put]. [In Russian]. Moscow, ITC «Akademkniga», 2003, 589 p. ISBN 5-94628-112-7.
4. Fedulov, V. F. On the accumulation of residual deformations of a crushed stone prism on a track with reinforced concrete sleepers: collection of scientific papers [O nakoplenii ostatochnykh deformatsii shchebenochnoi prizmy na puti s zhelezobetonnymi shpalami: sbornik nauchnykh trudov]. VNIIZhT, 1961, Issue 217: Stabilisation of crushed stone foundation of a railway track, pp. 107–115. [In Russian].
5. Baraboshin, V. F., Ananiev, N. I. Increasing the stability of the track in the rail joint area [Povyshenie stabilnosti puti v zone relsovogo styaka]. [In Russian]. Moscow, Transport publ., 1978, 45 p.
6. Under-sleeper pads on the track laid on ballast [Podshpalnie prokladki v puti na ballaste]. Zheleznie dorogi mira, 2011, Iss. 8, pp. 74–77. EDN: OKKJNX.
7. Shafranovsky, A. K. Track alignment during the final stage of stabilisation of a crushed stone prism [Vypravka puti v zaklyuchitelnoi stadii stabilizatsii shchebenochnoi prizmy]. [In Russian]. Tr. VNIIZhT, 1961, Iss. 217, pp. 71–98.
8. Zheltnin, G. G., Kuznetsov, V. V. Reduction of dynamic impact on the track at joints [Snizhenie dinamicheskogo vozdeistviya na put v styakakh]. Collection of scientific papers of the third scientific and practical conference «Resource-saving technologies in railway transport». [In Russian]. Moscow, MIIT publ., 2000, pp. 6–10.
9. Kaplin, V. N. Current track maintenance in the area of rail joints on particularly heavy-duty lines using elastic sleeper pads. Ph.D. (Eng) thesis [Tekushchee soderzhanie puti v zone relsovykh stykov na osobo gruzonapryazhennykh liniyakh s primeneniem uprugikh podshpalnykh prokladok. Diss...kand.tekh.nauk]. [In Russian]. Moscow, RUT (MIIT), 2022, 126 p. [Electronic resource]: https://www.miit.ru/content/Текущее%20содержание%20пути%20на%20особо%20грузонапряженных%20линиях%20с%20применением%20упругих%20подшпальных%20прокладок.pdf?id_wm=901547&ysclid=m8q13sk2lj563484604. Last accessed 28.09.2024.
10. Ashpiz, E. S. Monitoring of exploited roadbed: Theoretical solutions and practical application. D.Sc. (Eng) thesis [Monitoring eksploatiruемого zemlyanogo polotna: Teoreticheskie resheniya i prakticheskoe primeneniye. Diss.. dokt.tekh.nauk]. [In Russian]. Moscow, MIIT publ., 2002, 396 p. EDN: NMEFJL.
11. Fedorov, V. I. Prediction of strength and compressibility of foundations made of detrital clay soils [Prognoz prochnosti i szhimaemosti osnovanii iz oblomochnoglinistykh gruntov]. [In Russian]. Moscow, Stroyizdat publ., 1988, 128 p. ISBN 5-274-00107-6.
12. Albrecht, V. G., Zolotarsky, A. F. Modern designs of the track superstructure [Sovremennye konstruktivnyye verkhnego stroeniya puti]. [In Russian]. Moscow, Transport publ., 1975, 279 p.

Information about the authors:

Dylev, Egor O., Ph.D. student at the Department of Track and Track Facilities of Russian University of Transport, Moscow, Russia, dylev.egor@mail.ru.

Ashpiz, Evgeny S., D.Sc. (Eng), Associate Professor, Head of the Department of Track and Track Facilities of Russian University of Transport, Moscow, Russia, geonika@inbox.ru.

Article received 21.08.2024, approved 10.10.2024, accepted 18.11.2024.



Algorithm for Digitalising Technological Schedules of Train Processing Operations at Railway Stations



Zhivko YANEV



Nikita V. LUGOVSKY



Yuri O. PAZOYSKY



Sergey V. KALININ

Zhivko Yanev¹, Nikita V. Lugovsky², Yuri O. Pazoysky³, Sergey V. Kalinin⁴

^{1, 3}Russian University of Transport, Moscow, Russia.

^{1, 2, 4}Design & Research Institute for Information Technology, Signaling and Telecommunication on Railway Transport (JSC NIAS), Moscow, Russia.

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0856-341X>; Russian Science Citation Index SPIN-code: 8538-7511; Russian Science Citation Index AuthorID: 1092590.

³ Russian Science Citation Index SPIN-code: 5355-5945; Russian Science Citation Index AuthorID: 403168.

⁴ Russian Science Citation Index SPIN-code: 4957-2295; Russian Science Citation Index AuthorID: 403168.

✉ ¹ zivkoacter@yahoo.com.

ABSTRACT

Changing volumes of cargo transportation necessitate accelerated movement of cargo flows, including by modifying the technology of trains' transit through the railway infrastructure. In such conditions, it is necessary to create digital models, the purpose of which is to reproduce the work of the original. The results obtained following the operation of the digital model will serve as a rationale for further development of options for operation of the simulated object, aimed at fulfilling the up-and-coming indicators of operation of railway transport.

In this regard, as part of the study, an algorithm for digitalising technological schedules of train processing

operations. The purpose of the developed algorithm is to build software conform to its structure that ensures operational automated accounting of the technology of operations of original railway facilities in the conditions of transforming analogue information into its digital type. An algorithm based on a machine learning model was created using program, structural and system methods. The accuracy of determining the input technological operation is assessed by the purity of the information node, and more than 120 technological schedules of train processing operations at various railway stations were digitalised during the experiment.

Keywords: digital model of a railway station, digitalised technological schedule of train processing, stop word, lemmatisation, multiclass classification (random forest), text vectorisation, TF-IDF method, Gini index.

For citation: Yanev, Zh., Lugovsky, N. V., Pazoysky, Yu. O., Kalinin, S. V. Algorithm for Digitalising Technological Schedules of Train Processing Operations at Railway Stations. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 141–148. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-2>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

The need for prompt train traffic processing, particularly when reorientating of cargo traffic volumes, requires adjustments to the technology of railway stations operations [1]. In this regard, it is necessary to promptly prove the correctness of the proposed measures to change the infrastructure configuration or technology of railway station operations. It is possible through creating digital models of railway stations consisting of a block (unit) of a digital infrastructure model of a railway station and a block describing the technology of processing trains and resource elements included in it. A detailed structure of a digital model of a railway station is provided in the work [2]. The proposed blocks should ensure a high level of identity of the behaviour of the original in the virtual world, which, by creating digital infrastructure models and their digitalised technological schedules of train processing operations, will allow for accelerated or on-line planning and management of railway stations' operations, which is a very urgent task facing the railway transport, namely in the Russian Federation.

The works [3; 4] provide a definition of a digital model (digital twin¹) of a railway station, according to which digital models are generally intended to simulate the behaviour of the original under conditions of changing initial values and operational technology.

Digital models of a railway station can also be used to develop scenarios for the behaviour of objects within the framework of on-line management of railway transport. The authors of [5–7] concluded that the information base of technological parameters should include technological standards for operation of railway stations for subsequent operational forecasting.

The authors of [8] provide a list of the departments of JSC Russian Railways that are primarily subject to implementation and use of digital and quantum tools to improve customer service by advancing on-line decision-making. The study notes the importance of using digital modules in the process of planning the operation of the station, which confirms the relevance of developing a module for digitalising the technological

schedule for train processing operations.

To simulate the behaviour of an existing railway station (the original) under conditions of constant changes in initial values and operational technology, it is necessary to promptly adjust the technological schedules for train processing operations.

Hence, the *objective* of the study is development of a procedure for digitalising technological schedules of train processing operations automatically and with minimal time losses.

The proposed algorithm should be universal for subsequent use at the stages of preparing large-scale concepts and projects for digital transformation of companies [9].

The architecture of the algorithm for digitalisation of technological schedules of train processing operations was outlined using the *structural approach*, as well as its substantive part, consisting of five main blocks: input of initial information, byte transformation, lemmatisation, vectorisation, and issuing of a ready-made digitalised technological schedule of train processing operations.

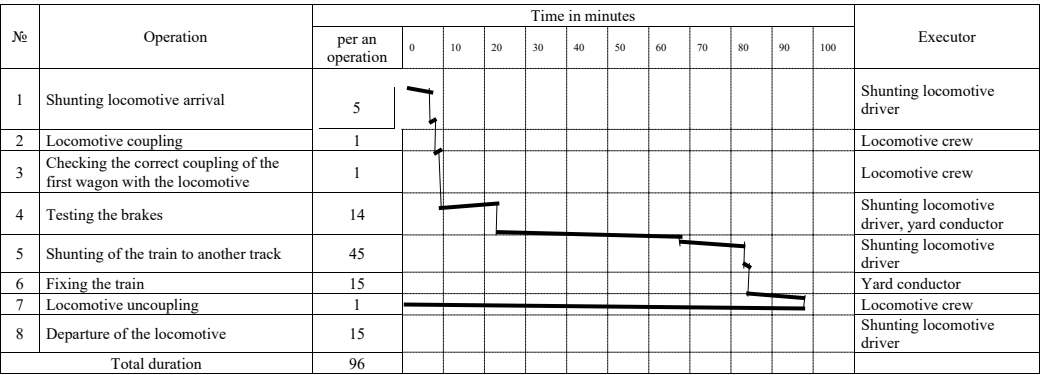
The system approach allowed us to formulate a list of requirements for the developed algorithm.

Using *the programming method*, the blocks were provided with the necessary functionality; several experiments were conducted with the developed software to digitalise the corresponding technological schedules of train processing operations. Based on the results of the use of the software, the purity of the information node is assessed, digital process chains are formed, and the latter are loaded into the multilevel management system software to further simulate the railway station operation.

When adjusting, updating or describing the operation technology of existing or newly created digital models of railway stations, modeller engineers² need from several hours to several days to recreate the technological behaviour of a real railway station. In this regard, this article proposes an algorithm for constructing and transforming technological schedules of train processing operations into

¹ Digital twins of RZD. How Russian Railways Use Digital Twins. [In Russian]. [Electronic resource]: <https://twins.rzddigital.ru/twins>.

² A modeller engineer is an employee with competencies and skills in the field of railway operations; experience in creating digital models of railway facilities and having a total work experience of at least two years. – *authors' note*.



Pic. 1. Example of a technological schedule of train processing operations [performed by the authors].

their digital type. The algorithm will result in a digitalised technological schedule of train processing operations³.

RESULTS

The data entry is input source file containing the technological schedules of train processing operations (Pic. 1).

Technological schedules for train processing operations are provided for in the regulatory documents of each railway station (as a technological process, technological map). They can be presented in the form of a drawing, graph, chart or table indicating the duration and sequence of execution of relevant operations.

The software developed according to the proposed algorithm (Pic. 2) should have the following functionality:

- To recognise the received information of two types (text and image).
- To convert the received type of information into byte format.
- To process text sentences and images for training the machine learning model.
- To vectorise the text using Term Frequency-Inverse Document Frequency method (the TF-IDF method; the choice of the TF-IDF method is explained by the fact that, for instance, the Word2vec method is more suitable for vectorising text in neural networks, and by the reasons described below).
- To create a digitalised technological schedule of train processing operations.

³ A digitalised technological schedule of train processing operations is a digital twin of an analogue technological schedule of train processing operations obtained through a specialised algorithm that considers the standard duration and sequence of operations with a train or other facilities at a railway station. – authors’ note.

After entering the initial information in the form of text or image, in accordance with the algorithm proposed in Pic. 2, the required information is selected by removing stop words from the sentences. After cleaning the processed text from stop words, the proposed algorithm launches the lemmatisation mechanism [11].

The algorithm for digitalising the technological schedule of train processing operations is built on the software using the Python programming language.

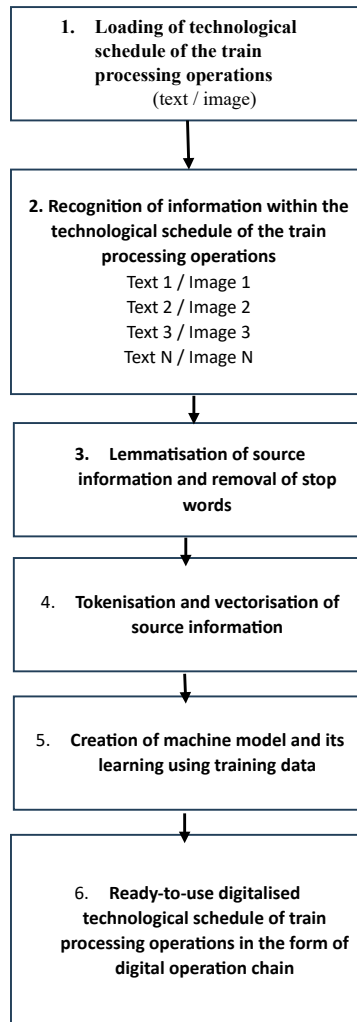
To recognise information obtained from the technological schedule of train processing operations, the algorithm must include two functions:

- The function of reading data from text: if the technological schedule is presented in the form of a table or a document with text, then the function takes the form shown in Pic. 3.
- The function for reading data from an image: if the technological schedule is presented in the form of an image or raster graphics, then the function takes the form shown in Pic. 4.

After the software has received information from two types of sources (text or image), the subsystem for converting the corresponding information into byte form is launched, as shown in Pic. 5.

The successful and error-free operation of the proposed text processing algorithm is influenced by tokenisation and vectorisation of the text [12]. Tokenisation is performed to separate the name of the technological operation into individual words while preserving their order. Text vectorisation is necessary to ensure a high degree of perception of the information provided by the machine learning model. The TF-IDF method [13; 14] was chosen for several reasons since it:





Pic. 2. Algorithm for digitalising the technological schedule of train processing operations [performed by the authors].

```

def read_tables_from_docx(docx_file):
    # Load the Word document
    doc = Document(docx_file)

    all_tables = []

    # Iterate through all tables in the document
    for table in doc.tables:
        table_data = []

        # Iterate through each row in the table
        for row in table.rows:
            row_data = []

            # Iterate through each cell in the row
            for cell in row.cells:
                # Get the text in each cell and append to row_data
                row_data.append(cell.text)

            # Append the row data to table_data
            table_data.append(row_data)

        # Append the table data to all_tables
        all_tables.append(table_data)

    return all_tables
  
```

Pic. 3. A fragment of the function for reading data from the text of the technological schedule initially composed in analogue format [performed by the authors].

```
def extract_images_from_docx(docx_file):
    doc = Document(docx_file)
    images = []

    for s in doc.inline_shapes:
        blib = s._inline.graphic.graphicData.pic.blipFill.blip
        rId = blib.embed
        document_part = doc.part
        image_part = document_part.related_parts[rId]
        image_bytes = image_part.blob
        images.append(image_bytes)

    return images
```

Pic. 4. A fragment of the function for reading data from the drawing of the technological schedule [performed by the authors].

No	Name of an operation	Duration of an operation	Digital form
1	Showing locomotive arrival	5	...
2	Showing locomotive coupling	1	...
3	Checking the correct coupling of the first wagon with the shunting locomotive	1	...
4	Testing the brakes	14	...
...

Pic. 5. An example (fragment) of transformation of the corresponding technological operation into byte form [performed by the authors].

- considers the importance of the word in the context of the document;
- identifies keywords;
- eliminates frequently occurring words;
- scales well (can be applied to large text corpora).

Vectorisation was performed using the TF-IDF method according to formula (1):

$$w_{x,y} = tf_{x,y} \times \log\left(\frac{N}{df_x}\right), \tag{1}$$

where $w_{x,y}$ – the value of words;
 $tf_{x,y}$ – the proportion of repetitions of a word x in one sentence in relation to the total number of such words x in all sentences;

N – number of sentences in the sample;
 df_x – the number of sentences from the total sample containing the word x .

Text vectorisation is the transformation of tokens into numbers. This action is necessary for further training, additional training and adjustment of the algorithm during operation of the machine learning model.

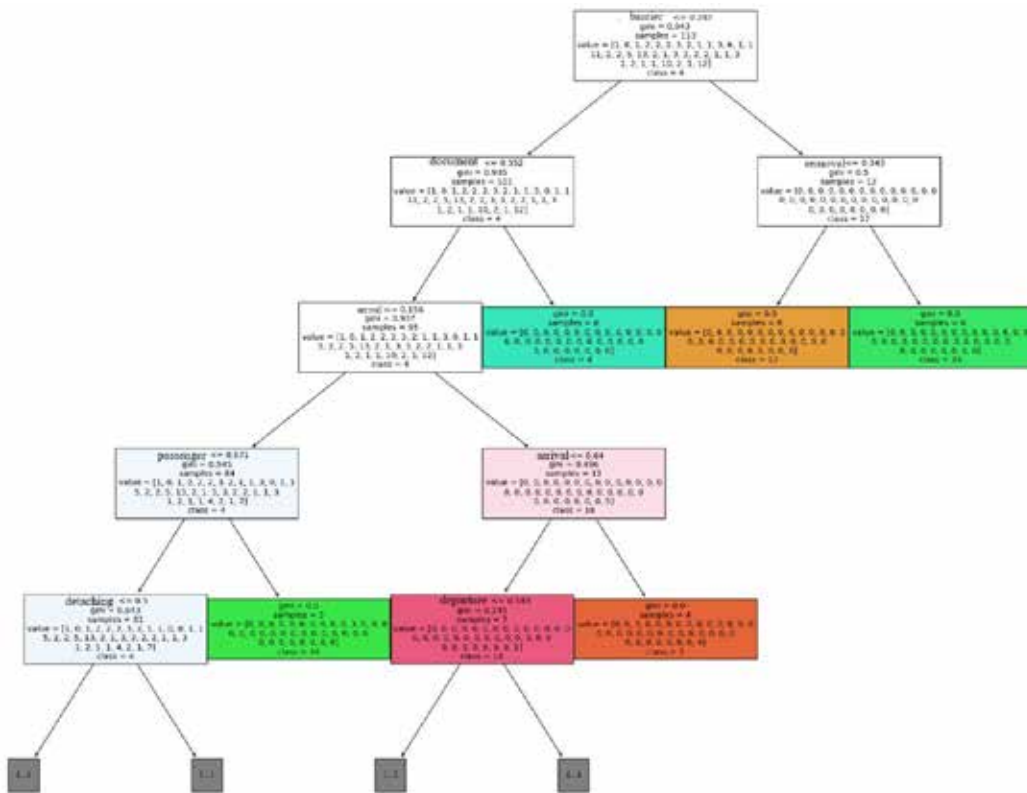
After successful tokenisation and vectorisation of the text, the technological schedule for train processing operations previously shown in Pic. 5 takes the form shown in Pic. 6.

Correct result of the machine learning model can be obtained through processing a larger



	shoe	blank	crew	car	delivery	departure	landing	stretching	hump	readiness	—	tgel	technical	brake	brake
0	0.0	0.0	0.0	0.000000	0.0	0.000000	0.000000	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.000000	0.0
1	0.0	0.0	0.0	0.000000	0.0	0.000000	0.000000	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.000000	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.357503	0.0	0.000000	0.000000	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.000000	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.000000	0.0	0.000000	0.000000	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.707107	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.000000	0.0	0.000000	0.000000	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.000000	0.0
...	—
108	0.0	0.0	0.0	0.000000	0.0	0.000000	0.725470	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.000000	0.0
109	0.0	0.0	0.0	0.000000	0.0	0.000000	0.000000	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.000000	0.0
110	0.0	0.0	0.0	0.000000	0.0	0.000000	0.000000	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.000000	0.0
111	0.0	0.0	0.0	0.336182	0.0	0.000000	0.000000	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.000000	0.0
112	0.0	0.0	0.0	0.000000	0.0	0.449694	0.535292	0.0	0.0	0.0	—	0.0	0.0	0.000000	0.0

Pic. 6. Results of tokenisation and vectorisation of the text of the technological schedule of train processing operations [performed by the authors].



Pic. 7. Structure of a machine learning model using multiclass classification (random forest) [performed by the authors].

amount of training data. Therefore, it is necessary to select an appropriate machine learning model that will help to form a set of skills, competencies and knowledge aimed at producing a digitalised technological schedule for train processing operations.

The machine learning model was trained in this study using multiclass classification (random forest), which ensures good processing of large data, stability of retraining and treating diverse data. The structure of the machine learning model is shown in Pic. 7.

The proposed multiclass classification machine learning model structure used Gini

impurity measurement [15; 16]. It measures the probability that a randomly selected element from the set will be incorrectly classified if it was randomly labelled according to the distribution of labels in the node. For a node with many elements belonging to different classes, Gini impurity is calculated as follows: If all the elements in the node belong to the same class, Gini impurity will be 0, which indicates the best possible purity of the node. However, if the elements are uniformly distributed across different classes, Gini impurity will be close to 0,5, which indicates the maximum uncertainty or heterogeneity of the node purity [15; 16].

```

parameters={'max_depth': [2,5,7,10], 'n_estimators': [10,50,100], 'min_samples_split': [10,20,30], 'min_samples_leaf': [10,20,30]}

scoring = {'accuracy': 'accuracy',
           'precision': 'precision_macro',
           'recall': 'recall_macro',
           'f1': 'f1_macro'}

clf = RandomForestClassifier()

grid_search_cv_clf=GridSearchCV(clf, parameters, cv=5, scoring = scoring, refit='accuracy')#добавление еще процесса-выбора лучшей с помощью cv
grid_search_cv_clf.fit(vectorize_text, numeric_labels)
best_params = grid_search_cv_clf.best_params_

```

Pic. 8. List of parameters showing the accuracy of a machine learning model [performed by the authors].

The accuracy of the machine learning model for digitalising the technological schedule of train processing operations can be formed based on the parameters (tree depth, number of trees, minimum number of samples, and minimum number of split sheets) shown in Pic. 8.

CONCLUSIONS

The machine learning model was applied to 127 experiments on digitalisation of technological schedules of train processing operations. Pic. 9 shows the final parameters of the machine learning model quality assessment regarding digitalisation of the technological schedule of train processing operations.

The accuracy assessment of the machine learning model for digitalising the technological schedule of train processing operations using training data is shown in Pic. 10 and amounted to 0,938 conventional units, which corresponds to a high level of accuracy in determining, perceiving, and converting the information received.

The implementation of the proposed algorithm resulted in a digitalised technological schedule of train processing operations in the form of a digital technological chain used in the process of modelling the operation of a railway station (Pic. 11).

The proposed algorithm for digitalising the technological schedule of train processing operations can be used for:

- Processing and transmitting orders, instructions and messages on board a locomotive, as well as to dispatchers (the proposed algorithm for processing analogue information is universal, therefore it allows for the digitalisation of documents that provide advance warning to the train crew about upcoming emergency restraints affecting the running speed of the train).

- Developing technological schedules for train processing operations at non-public railway stations. (Technological schedules for train processing operations at non-public railway

best_params

```

{'max_depth': 5,
 'min_samples_leaf': 10,
 'min_samples_split': 10,
 'n_estimators': 100}

```

Pic. 9. Numerical values of the model parameters providing the best values of accuracy metrics during the experiments conducted [performed by the authors].

```

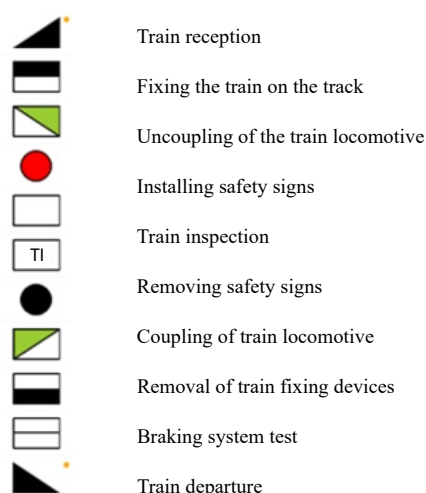
accuracy_score(clf.predict(vectorize_text), numeric_labels)

0.9380530973451328

```

Pic. 10. Assessment of accuracy of the artificial intelligence machine learning model for digitalising the technological schedule of train processing operations [performed by the authors].

stations are stored in analogue form. At the stage of describing the technology of operation of such facilities, it is necessary to create digital technological chains manually. This process takes from one week to two months, depending on the scale of the modelled object. Reduction of time costs for describing the technology of operation in this case will be achieved using the



Pic. 11. An example of a digital technological chain [performed by the authors].



proposed algorithm and software module for digitalising technological schedules of train processing operations).

– Shaping technological chains for train processing within the framework of projects of the Digital Railway Station (the multivariant mode of operation of the facility in the process of modelling requires prompt changes in the time standards for the implementation of technological schedules. The change in the technological schedules for train processing operations, as well as in the entered time standards, can be performed using the proposed software module and algorithm).

REFERENCES

1. Chigrin, N. S., Borisenkov, E. S., Grefenstein, A. P. Characteristics of the problems of cargo transportation by rail on Eastern direction [In Russian]. *Technique and technology of transport*, 2023, Iss. 4 (31). EDN: ZKCJKE.
2. Yanev, Zh. About the structure of a digital model of a railway station [IN Russian]. *Transport business of Russia*, 2024, Iss.3, pp. 186–190. EDN: OJZHAY.
3. Kostenko, V. V., Bogdanovich, D. E. Practical application of a digital model for a railway station reconstruction feasibility study. *Bulletin of scientific research results*, 2021, Iss. 1, pp. 61–73. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-1-61-73.
4. Golovnich, A. K. Determining the concept of «digital twin» in 3D models of railway stations [*Determinatsiya ponyatiya «tsifrovoy dvoynik» v SD-modelyakh zhheleznodorozhnykh stantsii*]. *Transport technician: education and practice*, 2023, Iss. 4 (2), pp. 184–192. DOI: <https://doi.org/10.46684/2687-1033.2023.2.184-192>.
5. Erofeev, A. A. Normative and reference information in the train formation system [*Normativno-spravochnaya informatsiya v sisteme poezdooobrazovaniya*]. *Bulletin of Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2007, Iss. 1–2 (14–15), pp. 54–59. EDN: YSDPLF.
6. Lysikov, M. G., Olshansky, E. N., Rozenberg, E. N., Rozenberg, I. N. Patent No. 2723051 C1 Russian Federation, IPC B61B 1/00. Operational control system for transit train traffic: No. 2019131595: application 08.10.2019: published 08.06.2020. Applicant: Joint-Stock Company «Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communications in Railway Transport». EDN: UTJFTN.
7. Kostenko, O. A., Parkhomenko, N. V. Principles of constructing a software digital model of a marshalling yard and its study on a digital computer [*Printsipy postroeniya programmoi tsifrovoy modeli sortirovochnoi stantsii i ee*

issledovanie na ECVI] [In Russian]. Moscow, Nauka publ., 1967, pp. 118–133.

8. Khomonenko, A., Khalil, M. M. Quantum computing in controlling railroads. In: E3S Web of Conferences: International Scientific Conference Transport Technologies in the 21st Century (TT21C-2023) «Actual problems of Decarbonization of Transport and Power Engineering: Ways of Their Innovative Solution», Rostov-on-Don, Russia, 05–07 April 2023, Vol. 383. A. Bieliatynskiy and A. N. Guda (Eds.). Rostov-on-Don, Russia: EDP Sciences, 2023, art. 01010. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338301010>.

9. Lakemond, N., Holmberg, G., Pettersson A. Digital Transformation in Complex Systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2024, Vol. 71, pp. 192–204. DOI: 10.1109/tem.2021.3118203.

10. Potyupkin, A. Yu., Chechkin, A. V. Artificial intelligence based on information and system redundancy [*Iskustvennyi intellekt na baze informatsionno-sistemnoi izbytochnosti*]. Moscow, Scientific and Publishing Center INFRA-M LLC, 2019, 384 p. ISBN 978-5-907064-44-7.

11. Zherdeva, M. V., Artyushenko, V. M. Stemming and lemmatization in lucene.net. *Bulletin of the Moscow State Forest University – Forest Bulletin*, 2016, Vol. 20, Iss. 3, pp. 131–134. EDN: WKNMTN.

12. Chelyshev, E. A., Otsokov, Sh. A., Raskatova, M. V., Shchegolev, P. Comparing classification methods for news texts in Russian using machine learning algorithms. *Proceedings in Cybernetics*, 2022, Iss. 1 (45), pp. 63–71. DOI: 10.34822/1999-7604-2022-1-63-71.

13. Oskina, K. A. Optimisation of TF-IDF text classification method by introducing additional weighting coefficients. *Bulletin of Moscow State Linguistic University. Humanities*, 2016, Iss. 15 (754), pp. 175–187. EDN: OPWIAU.

14. Polyakova, A. S., Lipinsky, L. V., Poplauhina, M. A. [et al.] Certificate of state registration of a computer program No. 2021681722 Russian Federation. An intelligent system for solving natural language analysis problems based on the text vectorization procedure using machine learning models, a genetic algorithm and the TF-IDF method: No. 2021681149: application 17.12.2021: published 24.12.2021; applicant: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Siberian State University of Science and Technology named after Academician M. F. Reshetnev». EDN: GVNFKK.

15. Disha, R. A., Waheed, S. Performance analysis of machine learning models for intrusion detection system using Gini Impurity-based Weighted Random Forest (GIWRF) feature selection technique. *Cybersecurity*, 2022, Vol. 5, Iss. 1, pp. 1–22. DOI: 10.1186/s42400-021-00103-8.

16. Demetriou, D., Michailides, C., Onoufriou, T., Papanastasiou, G. Coastal zone significant wave height prediction by supervised machine learning classification algorithms. *Ocean Engineering*, 2021, Vol. 221, art. 108592. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108592. ●

Information about the authors:

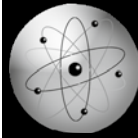
Yanev Zhivko, Senior Lecturer at the Department of Railway Stations and Transport Hubs of Russian University of Transport; Chief Simulation Modelling Specialist of Scientific and Technical Complex for Digital Modelling (STC DM) named after V. I. Umansky of Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communications in Railway Transport (JSC NIIS), Moscow, Russia, zivkoacter@yahoo.com.

Lugovsky, Nikita V., Analyst of Scientific and Technical Complex for Digital Modelling (STC DM) named after V. I. Umansky of Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communications in Railway Transport (JSC NIIS), Moscow, Russia, lnvlnikit@gmail.com.

Pazoysky, Yuri O., D.Sc. (Eng), Professor, Head of the Department of Railway Stations and Transport Hubs of Russian University of Transport, Moscow, Russia, pazoyskiy@mail.ru.

Kalinin, Sergey V., Deputy Director of Scientific and Technical Complex for Digital Modelling (STC DM) named after V. I. Umansky of Research and Design Institute of Informatization, Automation and Communications in Railway Transport (JSC NIIS), Moscow, Russia, hart82@gmail.com.

Article received 29.03.2024, approved 10.09.2024, accepted 08.10.2024.



Improving Quality of Guide Rods for Rail Vehicles' Suspension Systems by Changing Technology of their Manufacture



Tatiana A. POPOVA



Vladimir M. FEDIN



Alexander P. POPOV

Tatiana A. Popova¹, Vladimir M. Fedin², Alexander P. Popov³

^{1, 2, 3} Russian University of Transport, Moscow, Russia,

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6620-2292>; Scopus Author ID: 57215115792; Russian Science Citation Index SPIN-code: 8517-7756; Russian Science Citation Index AuthorID: 706166.

³ ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4618-4154>; Scopus Author ID: 57215127911; Russian Science Citation Index SPIN-code: 5652-9525; Russian Science Citation Index AuthorID: 705561.

✉ ¹ tatiana241187@gmail.com.

✉ ² vmfedin@yandex.ru

✉ ³ pap60@bk.ru.

ABSTRACT

Dependability of the suspension of metro coaches is directly determined by the parts included in the axle box (primary) suspension system.

The paper considers the spring suspension using guide rod. The guide rod presents a round steel rod that is attached through a bushing to the bogie bolster with its upper part, while its lower end is inserted into the axle box eye. The central section of the guide rod serves as a kind of guidepost for the suspension springs.

The operating principle is based on the ability of guide rods to distribute loads that occur during movement of a metro train. This technology can significantly reduce the wear of rails and wheel sets, thereby increasing safety and reducing the cost of rolling stock maintenance.

Today, there are a few problems caused by guide rods failures, the service life of which does not match the time parameters of failures of car bogie frames. Among other things, many items are rejected at the stage of production tests due to internal defects. Since dependability issues are the most acute, it is extremely important to find ways to increase the durability of the primary suspension systems using guide rods. The study is aimed at finding optimal technological solutions for manufacture of the items based in the analysis of the material and possible methods of processing guide rods.

The study has resulted in a conclusion on promising character of quenching cooling with a fast-moving water flow, since the achievement of all the required parameters was proven during the relevant tests.

Keywords: metro, guide rod, axle box suspension, strengthening of parts, heat treatment, steel quenching, steel 40X, steel 35.

For citation: Popova, T. A., Fedin, V. M., Popov, A. P. Improving Quality of Guide Rods for Rail Vehicles' Suspension Systems by Changing Technology of their Manufacture. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 149–152. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-3>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The design of Russian metro coaches widely used a link suspension system and a spring suspension system using guide rods, the latter being considered most dependable. This unit is used to ensure stability and comfort in coaches. The guide rod itself is the central element of the vibration damper, which in turn is a mechanism designed to reduce the amplitude of vertical movements of the body that occur during movement of coaches and works in tandem with the suspension's springs. The essence of the operation of the guide rod is to create dissipative (dispersive) forces that are activated when interacting with the springs for effective vibration damping. The structural layout of the guide rod unit is shown in Pic. 1.

During operation, the guide rod is exposed to a wide range of loads – both dynamic and static ones. This circumstance emphasises the importance of the *objective* to determine its dependability and durability.

RESULTS

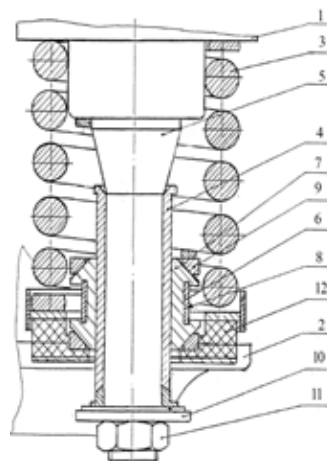
Analysis of the material of the guide rod

The initial stages of using guide-rod type bogies revealed a problem of fatigue cracks in the area of intersection of the annular welds of the inner guide rods' bushings with the longitudinal welds of the longitudinal beams. This led to negative consequences. Several design and technological measures, such as welding a special pad on the upper shelf in the weld zone of the bushing and double-sided edge preparation for the annular weld, made it possible to only partially solve this problem.

New methods of treatment and research of materials allow developing effective technical and technological solutions to prevent further damage and ensure safe operation of bogies.

Most guide rods today are manufactured according to the requirements of design documentation from grade 40X steel. This material, which meets GOST [Russian state standard] 4543 requirements, is enriched with chromium in the range of 0,78...1,15 %, which provides the product with high dependability in terms of operational characteristics [1]. This type of structural steel is considered to be the best due to its resistance to damage and durability, although it is associated with a high cost. Despite this, a significant number of guide rods are subject to rejection due to the presence of non-metallic inclusions. They are defects of the original metal, which can manifest themselves both on the surface and in the subsurface layer of the product [2]. Such defects are found using the magnetic method of non-destructive testing. It should be noted that even high-quality steels can contain non-metallic inclusions, which does not exclude their use in production, but requires careful monitoring.

To improve economic efficiency, alternative solutions are proposed, including replacing the original



Pic. 1. Guide rod unit of a metro coach: 1- bogie frame, 2- axle-box body, 3- spring, 4- plastic sleeve, 5- guide rod, 6 – ring, 7 – blocks, 8 – tapered groove stem, 9- V-ring, 10- disk spring, 11- nut, 12 – rubber damper³.

material with one similar in its characteristics. Steel with comparable physical properties is considered. To optimise the choice of material, an analysis and comparison of all proposed alternatives is carried out according to several criteria, including cost, availability and compliance with technical production requirements¹. This approach allows not only to guarantee the high quality of the final product, but also to ensure the economic efficiency of the production process.

Making final selection of materials involves considering operating conditions and external factors such as mechanical loads and environmental influences [3]. If necessary, issues of improving the mechanical properties of parts by introducing additional strengthening treatment are developed².

Several suitable materials are considered, including carbon steels: steel 35, steel 45 and steel 47GT.

Conducting a comparative analysis of the composition of metals allows us to understand their mechanical properties and processability. In addition, this helps to optimise production processes and improve the quality of finished products. The analysis of the chemical composition of steel grade 40X is shown in Table 1.

The analysis of the results given in Table 1 shows that the actual composition of 40X steel complies with the requirements of GOST 4543.

¹ Recommendations for the use of low-alloy high-strength steels for welded structures: research report. E. O. Paton Electric Welding Institute. Kyev, 1977, 77 p.

² GOST [State Standard] 1050–2013 Metal products made of non-alloy structural quality and special steels.

³ Savinov, S. Yu. Patent RU 16722 U1. Russian Federation. Resonance oscillations' damper, No 2000119297/20, appl. 15.02.2000; publ. 02.10.2001. Federal unitary state enterprise «Central design bureau of transport mechanical engineering, 8 p. [Electronic resource]: https://patents.s3.yandex.net/RU16722U1_20010210.pdf. Last accessed 10.10.2020.

Table 1

Chemical composition of guide rod made of steel 40X [compiled by the authors]

Object of study	Element, mass fraction, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Guide rod, steel 40X	0,42	0,23	0,67	0,001	0,005	1,05	0,09	0,05
Requirements of GOST 4543–71	0,35–0,45	0,15–0,39	0,48–0,82	no more than		0,78–1,15	no more than	
				0,035	0,035		0,30	0,30

Table 2

Chemical composition of guide rod made of steel 35 [compiled by the authors]

Object of study	Element, mass fraction, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu
Guide rod, steel 35	0,33	0,24	0,62	0,001	0,005	0,11	0,09	0,06
Requirements of GOST 1050–2013	0,31–0,41	0,15–0,39	0,47–0,83	no more than				
				0,040	0,035	0,25	0,30	0,30
Guide rod, steel 35 (select)	0,38–0,41	0,35–0,39	0,79–0,83	no more than		0,21–0,25	0,25–0,30	no more than
				0,040	0,035			

Steel 35 is considered an alternative material for production of guide rods. It is a medium-carbon steel, which is used after normalisation, improvement and surface hardening for various machine parts [4]. The chemical composition of steel 35 is given in Table 2.

The analysis of the results of the study of steel 35, shown in Table 2, allows us to make sure that its chemical composition complies with the standards of GOST 1050.

The choice in favour of steel 35 is based on several advantages over other similar materials: products made from it can withstand high impact loads. The material is characterised by the absence of a tendency to crack formation. In addition, steel 35 is characterised by a combination of low plasticity and hardness. Among the advantages, we can also name the cost characteristics: the simplicity of the production process affects the relatively low price of the product. There is also no need to introduce expensive alloying additives. Steel 35 is characterised by a fairly wide temperature range of application from –40 to +425°C.

Modernisation and optimisation of guide rod manufacturing technology

Processing of parts requires carefully selected methods to achieve optimal properties of products⁴. The most rational technological process for processing guide rods consists of the following stages: a blank obtained by stamping, normalisation, shot cleaning, which ensures removal of burrs and other surface defects [5]. The next stage is mechanical treatment for precise finishing of the shape and dimensions of the part. Next comes heat treatment, including heating, quenching cooling and tempering.

In the basic version, to eliminate quenching cracks on a guide rod made of steel 40X, it is necessary to

carry out simultaneous intensive quenching cooling with heat removal from all parts of the item [6–8]. The quenching medium is oil. To solve the problem of environmental friendliness of production, which will become increasingly relevant over time, it is proposed to replace the quenching medium of oil with water. This will reduce the negative impact on the environment. A fast-moving stream of water is used to cool the material considering the flow rate, pressure and temperature to achieve the desired characteristics of the hardened product [9].

The quality indicator is ensuring uniform hardness along the entire perimeter of the product without the need to resort to additional operations such as induction heating [10; 11].

Analysis of operational damage to a guide rod made of steel 40X shows that damage most often occurs in the «210» zone (see Pic.2), which is caused by a change in the strength properties of the metal in the transition area from the high-strength zone hardened by induction to the zone with an improved structure.

When testing guide rods to assess the quality of products, it is necessary to evaluate the hardness, mechanical properties of the section of the parts, impact toughness and to conduct metallographic studies.

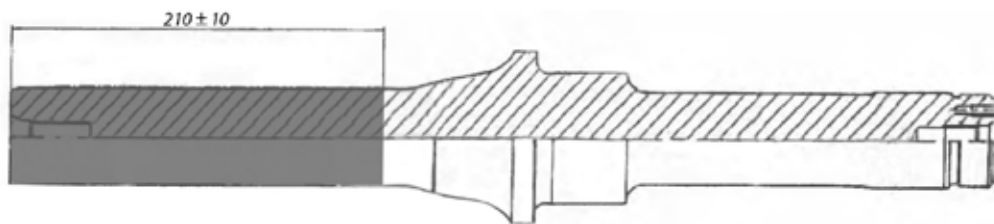
When selecting optimal temperature exposure modes (the effect of exposure duration and temperature on the quality parameters of products is shown in [12–14]) in the process of quenching with a fast-moving water flow and subsequent tempering, it is possible to achieve uniform hardness over the entire section of the guide rod at a level of 45–50 HRC.

CONCLUSIONS

Spring suspension systems using guide rods are an important technical solution in the field of railway engineering and metro rolling stock. The development of new approaches to quenching cooling technology



⁴ GOST 2999–75. Metals and alloys. Vickers hardness measurement method. Introduced 1976.01.07. Moscow, USSR State Committee on Standards, 1975, 31 p.



Pic. 2. Scheme of the zone «210» of a guide rod [developed by the authors].

in guide rod manufacturing is important for increasing dependability and durability of products. The proposed quenching cooling technology with a fast-moving water flow suggests the following advantages:

- improving the environmental situation due to the transition from quenching in oil to water;
- reducing the cost of parts when using steel 35 instead of steel 40X.

Thus, the new technological process for guide rod manufacturing will not only improve the quality and accuracy of the manufactured parts but will also be significantly beneficial in terms of economic efficiency and environmental safety, which in turn will ensure a high degree of comfort and safety of passenger transportation but will also open up new prospects for development and improvement of metro trains.

REFERENCES

1. Baranov, I. V., Ermolin, Yu. A., Reva, V. F. Some issues of design and manufacturing technology of elements and units of rolling stock's bogie frames associated with increasing fatigue strength [*Nekotorye voprosy konstruirovaniya i tekhnologii izgorovleniya elementov i uzlov ram telezhek podvizhnogo sostava, svyazannie s povysheniem ustalostnoi prochnosti*]. *Trudy MIIT*, 1968, Iss. 296, pp. 3–20.
2. Guschin, A. N., Gusev, Yu. B., Sozinov, S. V. Behaviour of low-carbon preliminarily deformed steel under static and cyclic load // *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2013, Iss. 5 (102), pp. 168–176. [Electronic resource]: <https://www.ntu.ru/frontend/web/ngtu/files/nauka/izdaniya/trudy/2013/05/2013-05pdf> [full text of the issue]. Last accessed 28.03.2024.
3. Bhadeshia, H. K. D. H., Honeycombe, R. W. K. Steels: Microstructure and Properties. 4th ed., 2017. ISBN 978-0-08-100270-4.
4. Pickering, F. B. Physical metallurgy and the design of steels [Ed. in Russian: *Fizicheskoe metallovedenie i razrabotka stali*]. Moscow, Metallurgy publ., 1982, 184 p.
5. Zaides, S. A., Vu Van, H., Doan Thanh, V. Developing installation to increase cylindrical part surface hardness // *iPolytech Journal*, 2020, Vol. 24, Iss. 2, pp. 262–274. DOI: <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-2-262-274>.
6. Wang, Li, Speer, J. G. Quenching and Partitioning Steel Heat Treatment. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2013, Vol. 2, pp. 268–281. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13632-013-0082-8>.
7. Inoue, T., Raniecki, B. Determination of thermal-hardening stress in steels by use of thermoplasticity theory. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1978, Vol. 26, Iss 3, pp. 187–212. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(78\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0022-5096(78)90008-X).
8. Shepelyakovskiy, K. Z. Hardening of machine parts by surface hardening under induction heating [*Uprochnenie detalei mashin poverkhnostnoi zakalkoi pri induktsionnom nagreve*]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1972, 288 p.
9. Kuznetsova, N. Yu. Study of the cooling capacity of a flow of fast-moving water during volume-surface hardening of steel [*Issledovanie okhlazhdayushchei sposobnosti potoka bystrodvizhushcheysya vody pri obemno-poverkhnostnoi zakalke stali*]. *XI International Scientific and Technical Ural School-Seminar of Young Scientists-Metallographers*. Yekaterinburg, 2010, pp. 43–45.
10. Kolmogorov, G. L., Kuznetsova, E. V., Tiunov, V. V. Technological residual stress and its impact on durability and dependability of fabricated metal products. Monograph. Perm, Perm National Research Polytechnic University, 2012, 226 p. ISBN: 978-5-398-00840-1.
11. Khvorostukhin, L. A., Shishkin, S. V., Kovalev, A. P. [et al]. Increasing the load-bearing capacity of machine parts by surface hardening [*Povyshenie nesushchei sposobnosti detalei mashin poverkhnostnym uprochneniem*]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1988, 144 p.
12. Kobasko, N. I., Prokhorenko, N. I. Effect of cooling rate during hardening on crack formation in steel 45 [*Vliyaniye skorosti okhlazhdeniya pri zakalke na obrazovanie treshchin v stali 45*]. *Metal science and heat treatment of metals*, 1964, Iss. 2, pp. 53–54.
13. Wu, B. W., Chen, G. X., Lv, J. Z., Zhu, Q., Zhao, X. N., Kang, X. Effect of the axlebox arrangement of the bogie and the primary suspension parameters on the rail corrugation at the sharp curve metro track. *Wear*, Vol. 426–427, Part B, 2019, pp 1828–1836. DOI: 10.1016/j.wear.2019.01.038.
14. Iwnicki, S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics (1st ed.). CRC Press. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420004892>. ISBN-13: 978-0-8493-3321-7. [Access for subscribers only].

Information about the authors:

Popova, Tatiana A., Senior Lecturer at the Department of Transport Mechanical Engineering and Rolling Stock Repair Technology of Russian University of Transport, Moscow, Russia, tatiana241187@gmail.com.

Fedin, Vladimir M., D.Sc. (Eng), Professor at the Department of Transport Mechanical Engineering and Rolling Stock Repair Technology of Russian University of Transport, Moscow, Russia, vmfedin@yandex.ru

Popov, Alexander P., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Transport Mechanical Engineering and Rolling Stock Repair Technology of Russian University of Transport, Moscow, Russia, pap60@bk.ru.

Article received 05.12.2023, approved 21.04.2024, accepted 23.04.2024.



Analysis of the Operation of a Distributed Ledger: An Example of the Airport



Igor N. ROZENBERG



Iakov M. DALINGER

Igor N. Rozenberg¹, Iakov M. Dalinger²

^{1,2} Russian University of Transport, Moscow, Russia.

¹ ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9589-6783>; Web of Science Researcher ID: AAD-7632-2019; Scopus Author ID: 15136568900; Russian Science Citation Index SPIN-code: 2958-4186; Russian Science Citation Index Author ID: 652172.

² ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7744-7156>; Scopus Author ID: 57195278185; Russian Science Citation Index SPIN-code: 8895-3700; Russian Science Citation Index Author ID: 704687.

✉ ² iakovdalinger@gmail.com.

ABSTRACT

Possibilities to use distributed ledger technology are shown referring to storing data in information systems of airports and aviation systems of various levels.

The features of the operation of a distributed ledger are noted regarding information systems. Various options for generating messages for storage using distributed ledger technology are studied along with the parameters of message flows. The features of using blockchain technology when creating distributed ledger

are highlighted in case of the need to correct the stored information.

A possibility to use network technologies is shown for forming distributed ledger, the nodes of which are located at significant distances from each other (registries of several airports).

The provided data can be used to create reliable distributed information storage facilities, both within a separate airport and for a group of airports.

Keywords: distributed information system, distributed ledger, blockchain, information security, cryptographic protection, mathematical models, civil aviation, airports.

For citation: Rozenberg, I. N., Dalinger, Ia. M. Analysis of the Operation of a Distributed Ledger: An Example of the Airport. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 153–157. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-4>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

Distributed ledger technology (often blockchain-based technology) is becoming increasingly popular in the creation of distributed information systems due to its features such as [1–6]:

- Distributed storage of copies, allowing simultaneous access to the ledger by many users in different geographic locations.
- Impossibility of making unauthorized changes to the created copies.
- High functional reliability of the ledger.
- Ability to control access to copies in the ledger.
- Coherence (full compliance) of copies in the ledger.
- Ability to unlimitedly expand the ledger's content.

This allows the use of distributed ledger technology to build specialised information systems for enterprises and their pools at the regional and federal levels¹.

The process of creating specialised information systems based on distributed ledgers and their operation differ significantly from the methods of creating and operating systems related to cryptocurrency, which must be considered when carrying out development.

The main differences are as follows:

- The absence of mining associated with the need to compete for the right to enter data into the ledger and for remuneration.
- Territorial localisation of copies of the distributed ledger (e.g., within a region, state, etc.).
- Compliance with legislative, industry and other regulations governing the processing of and access to information.
- The need to ensure the protection of information from specific threats associated with the functioning of the ledger, the properties of the stored information, access control (solving cybersecurity problems).
- The need to ensure access to the ledger for many users (administrators maintaining the ledger; users making requests to the ledger).
- The presence of special means of checking (validating) data entered into the ledger, depending on the purpose of the data.
- The presence of cryptographic means of data protection (encryption, hashing, authentication) [7–11].

Besides, ledger copies contain a large amount of different information structured in blocks, which requires the creation of means for searching and

presenting it in a user-friendly form (ledger database).

All this determines the feasibility of creating methods for analysing distributed ledger variants, due to the specifics of its practical application.

Among the tasks of an organisation, an important place belongs to the tasks of forming a flow of data blocks to be recorded in the ledger.

The objective of the study is to analyse a possibility of using distributed ledger technology in creating distributed databases of information systems of airports and airlines of various levels.

The study used *methods* of system analysis, queue theory, probability theory, theory of computer networks and information systems.

RESULTS

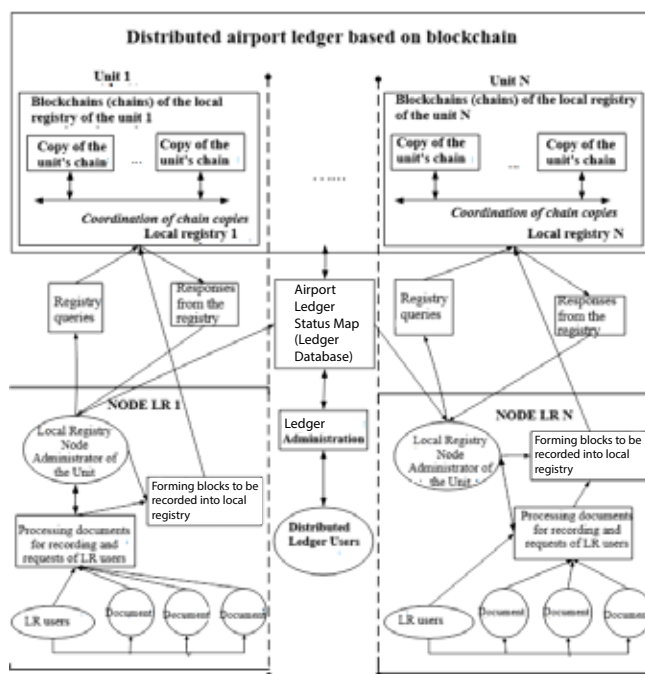
Description of the Ledger

It is advisable to create a distributed ledger as a development of integrated distributed databases, when there is a set of information resources with established links, a system of queries and updates [12]. A possible option for organising a distributed ledger is considered for a case of a transport enterprise, for example, an airport, with the following characteristics:

1. A distributed ledger is created based on existing information resources and consists of a group of local data registries of individual airport divisions.
2. All local registries can be created in the form of blockchains – special data chains with the properties listed above [1; 2; 6; 11].
3. It is advisable to use blockchain technology in case where there are increased requirements for data security, but this creates significant difficulties with making changes to the stored data.
4. Each local registry is created for one or more airport divisions; information from local registries may overlap.
5. To enter records (blocks) into local registries, special workstations with the appropriate software are allocated, allowing for validation and reconciliation of data.
6. Copies of local registries are available to employees, registries' administrators of the relevant departments, who ensure their filling and registries' operation upon requests of airport employees and external organisations (registries' users).
7. The distributed ledger contains a map of local registries (ledger's database), where data for access to local registries upon requests is generated.

Working with the ledger consists of generating blocks of documents for recording, recording blocks and copies in local registries, processing requests to

¹ Spirkina, A. V. Development of a model for the application of distributed ledger systems and assessment of their impact on network characteristics. Ph.D. (Eng) thesis. St.Petersburg, SPbSUT publ., 2022, 186 p.



Pic. 1. Generalised structure of the airport distributed ledger [compiled by the authors].

the registry (searching for the required information, presenting the found information in the required form). The blocks generated for recording are checked (validated) for the absence of copies, the correctness of the recording and, after successful verification, are recorded according to the established rules in the local registry (blockchain) of the relevant department.

An example of a variant of the generalised structure of an airport's distributed ledger is shown in Pic. 1. In this case, local registries are created using blockchain technology.

It is possible to scale the structure for an air transport system that includes several aviation and auxiliary (servicing) enterprises.

Employees – administrators of local registries have the right to form blocks of documents to be recorded into their registries, process queries to registries.

Blocks consist of a finite number of documents that are processed in a given department (unit).

Each administrator forms blocks from a given set of documents available to him, so that the blocks of different administrators do not contain identical documents.

Documents can be formed during a unit's work, or come from external departments or organisations.

Before recording the created block into the local registry, it is validated, which consists of checking the correctness of the documents, checking the absence of identical documents in different blocks,

checking the correctness of the data entry regarding the owner (creator) of the block.

For validation, the created block is sent to all employees – administrators of the local registry. The administrator who received the block checks it and sends a response with the results of the check to the address of the administrator who created the block.

If all the responses are collected and they are all positive, the administrator who created the block records it into his copy of the local registry.

If several administrators work with one and the same copy, then the recording occurs in the order established for them without drawing the recording right.

At specified times, the local registry copies are reconciliated.

It is possible to clarify the operations related to the specifics of an enterprise, for example, the use of document encryption, distribution of keys for processing blocks and documents, establishment of special rules for maintaining and agreeing on copies of the local registry.

To ensure the search for documents within the entire distributed ledger, a map of local registries of an institution is compiled. The map is a specialised database that stores information on the location of documents, data on block owners, data for generating queries to local registries.

To create and ensure the operation of local registries of the distributed ledger, hardware and software tools are created – nodes of local registries,



which can be considered as workstations of local registries' administrators [2; 3]. Data blocks for recording in the ledger are created on the nodes.

All nodes operate as part of the local network of the institution or a regional or local network.

The network must provide the ability to implement established access rights to nodes for employees of the institution, provide protection from unauthorised access to registries and ledger, protect communication channels, and ensure the localisation of the distributed ledger within the institution. There are various solutions to these problems, which have been thoroughly studied in the literature [8; 14; 15].

Mathematical Models of Local Registry Nodes

The creation of a distributed ledger requires solving series of problems and analysis, allowing to obtain numerical values of the characteristics of the distributed ledger operation depending on the parameters (intensity of the flow of queries to the ledger, intensity of the flow of documents to be entered into the ledger, duration of query processing in the ledger, structure and composition of ledger blocks):

- Analysis of the processes of forming document blocks on recording nodes in local registries.
- Analysis of the processes of recording blocks in blockchains of local registries and creating copies.
- Analysis of the processes of processing ledger users' queries.

To carry out the analysis, mathematical models with message absorption have been developed, presented in works [13; 16–18]. Several models allowing to study network structures are presented in work [14].

In this case, the absorption of elementary messages (documents) implies their formation into the blocks to be recorded in the ledger.

In the models, each document corresponds to an elementary message, and the process of forming a block of documents corresponds to the creation of a complex message (block) in systems with the absorption of elementary messages.

As a rule, the number of documents received for processing and storage is finite, therefore, as a node model, a system with a fixed composition of a complex message (block of documents) and a limited number of places for elementary messages (documents) waiting in queue was considered.

When creating the models, it was assumed that N document streams, elementary messages ($\infty > N \geq 1$) arrive at the node, and M blocks (complex messages) are formed from these messages. The rules for forming blocks on nodes are specified by the

matrix $\mathbf{M} = \|m_{ij}\|$, where $m_{ij} \geq 0$ is the number of documents of a stream number j that are part of a block of type i ($i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$) [19].

When forming the elements of the matrix \mathbf{M} , it was assumed that the following conditions were met:

a) Documents of each stream can participate in the creation of blocks of only one type (sets of available documents are established for each employee and each department (unit) creates its own blocks and documents).

b) Each block includes at least one document.

There are possible options that are considered in mathematical models:

– The duration of a block formation is unlimited, and the formation ends when the required number of documents are received.

– The duration of block formation is limited.

– The number of documents in a block is a random value.

The loss of documents in the ledger is excluded by setting a sufficiently large number of places on the nodes for documents to wait for the formation of blocks in which they will be included.

Models for analysing options are presented in [13; 16–18; 20]. The models make it possible to additionally study the following options for the composition of the generated document blocks: a block is formed from documents of only one type (stream), the number of which is specified; a block is formed from documents of different streams, the number of documents of each stream is specified.

The use of mathematical models allows us to calculate the values of the ledger's characteristics that particularly include:

- Average duration of forming a block of documents to be recorded in the ledger.
- Average waiting time for a document to be recorded in the ledger.
- Average length of the documents' queue.
- Average time of recording a block in the ledger (when calculating this characteristic, the absence of competition for recording in the ledger (blockchain) is considered and the recording occurs according to the order established for the administrators' nodes).

The models allow us to vary parameters of the ledger (of the models, respectively) to find optimal or acceptable solutions in terms of the characteristic values. These parameters include:

- Block composition.
- Average duration of block formation.
- Acceptable length of the documents' queue.
- Number of administration nodes for the local registry.

Mathematical models of system analysis can be used to analyse the processes of creation and operation of a distributed ledger that operates without drawing the right to record the generated blocks (complex messages).

CONCLUSIONS

Distributed ledger technology and blockchain technology today occupy an important place in solving information security problems: ensuring integrity, protecting against data modification, access control, and data reconciliation.

A wide variety of practical applications where data is used requires the development and preliminary analysis of methods for creating data blocks for storage in the ledger, the structure and algorithms for the operation of distributed ledger nodes. To solve these problems, it is advisable to use mathematical modelling.

Data on the possible development and study of a distributed ledger based on blockchain for an airport can be scaled for the case of an air transport system, for regional air transportation management systems.

REFERENCES

1. Bashir, I. [Original title] Mastering Blockchain: Distributed ledger technology, decentralization, and smart contracts explained. Edition in Russian, transl. from English by Raitman, M. A. Moscow, DMK Press publ., 2019, 538 p. ISBN 978-5-97060-624-7.
2. Gorbunova M. V., Ometov A. Y., Komarov M. M., Bezzateev S. V. Survey of distributed ledger technology integration challenges. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]*, 2020, No. 2, pp. 10–19 (In Russian). DOI: 10.31799/1684-8853-2020-2-10-19.
3. Nosirov, Z. A., Fomichev, V. M. Analysis of Blockchain Technology: Architectural Basics, Application Examples, Future Trends, Problems and Disadvantages. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, Iss. 2, pp. 37–75 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-37-75.
4. Khan, N. FAST: A MapReduce Consensus for High Performance Blockchains. Proceedings of the 1st Workshop on Blockchain-enabled Networked Sensor Systems. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1145/3282278.3282279.
5. Sadeghi, M., Mahmoudi, A., Deng, X. Adopting distributed ledger technology for the sustainable construction industry: evaluating the barriers using Ordinal Priority Approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, Vol. 29 (7), pp. 10495–10520. DOI: 10.1007/s11356-021-16376-y.
6. Sherman, A. T., Javani, F., Zhang, H., Golaszewski, E. On the Origins and Variations of Blockchain Technologies.

IEEE Security Privacy, 2019, 17(1), pp. 72–77. DOI: 10.1109/MSEC.2019.2893730.

7. Ryabko, B. Ya., Fionov, A. N. Cryptography in the information world [*Kriptografiya v informatsionnom mire*]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom publ., 2018, 300 p. ISBN: 978-5-9912-0729-4.
8. Stallings, W. Cryptography and Network Security. Principles and Practice. Edition in Russian, transl. from English. 2nd ed. Moscow, Williams publ., 2001, 672 p. ISBN: 5-8459-0185-5.
9. Tehmora, A. Modern applied cryptography [*Sovremennaya prikladnaya kriptografiya*]. Moscow, Gelios ARV publ., 2001, 256 p. ISBN: 5-85438-037-4.
10. Haber, S., Stornetta, W. S. How To Time-Stamp a Digital Document. *Journal of Cryptology*, 1991, Vol. 3, Iss. 2, pp. 99–111. DOI: 10.1007/bf00196791.
11. Narayanan, A., Bonneau, J., Felten, E., Miller, A., Goldfeder, S. Bitcoin and Cryptocurrency Technologies: A Comprehensive Introduction. Princeton University Press, 2016. 336 p. ISBN: 978-0-691-17169-2.
12. Arsenyev, B. P., Yakovlev, S. A. Integration of distributed databases [*Integratsiya raspredelennykh baz dannykh*]. St. Petersburg, Lan publ., 2001, 464 p. ISBN: 5-8114-0300-3.
13. Pankov, K. N., Saksonov, E. A. Using Probabilistic Methods in the Analysis of Information Security of Distributed Ledger Systems. In: 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. DOI: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416006.
14. Vishnevsky, V. M. Theoretical foundations of designing computer networks [*Teoreticheskie osnovy proektirovaniya kompyuternykh setei*]. Moscow, Tekhnosfera publ., 2003, 512 p. ISBN: 5-94836-011-3.
15. Tanenbaum, A. S., Van Steen, M. Distributed Systems: Principles and Paradigms. Edition in Russian. St. Petersburg, Piter publ., 2003, 877 p. ISBN: 5-272-00053-6.
16. Dalinger, Ia. M. Analysis of Complex Messages Flows in Information Processing Systems. *Vestnik TOGU*, 2015, Iss. 1 (36), pp. 59–64. EDN: TPTDKD.
17. Dalinger, Ya. M., Leokhin, Yu. L., Saksonov E. A. The Model of the Processing Node with the Data Absorption. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, Belarus, 2018, pp. 193–197. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457008.
18. Saksonov, E. A., Leokhin, Yu. L., Dalinger, Ya. M. The Model of the Processing Node with the Data Replication. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, Belarus, 2018, pp. 564–568. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457025.
19. Dalinger, I. M. Analysis of data streams in systems with message absorption [*Analiz potokov dannykh v sistemakh s pogloshcheniem soobshcheniy*] Informatics and Control Systems, 2012, No. 3, pp. 26–34. [Electronic version of the journal]: https://ics.togudv.ru/media/2012/N33_03_1.pdf. Last accessed 23.08.2024.
20. Maull, R., Godsiff, Ph., Mulligan, C., Brown, A., Kewell, B. Distributed ledger technology: Applications and implications. FINRA, 2017, Vol. 26, Iss. 5, pp. 481–489. DOI: 10.1002/jsc.2148 [access for subscribers]. ●

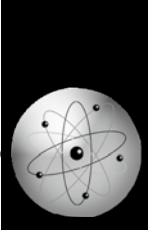
Information about the authors:

Rozenberg, Igor N., D.Sc. (Eng), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Scientific Officer of Russian University of Transport, Moscow, Russia, tu@mit.ru.

Dalinger, Iakov M., Ph.D. (Eng), Vice-Rector of the Scientific and Educational Center for Air Transport of Russian University of Transport, Moscow, Russia, iakovdalinger@gmail.com.

Article received 16.08.2024, approved after reviewing 16.09.2024, accepted 25.09.2024.





Method for Determining Durability of a Bridge Superstructure



Gleb L. OGURTSOV



Nikolay A. ERMOSHIN

Gleb L. Ogurtsov¹, Nikolay A. Ermoshin²

^{1,2} Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia.

¹ ORCID: 0000-0002-5183-7420; Web of Science Researcher ID: AFI-6310-2022; Scopus Author ID: 57939891300; Russian Science Citation Index SPIN-code: 1150-8781; Russian Science Citation Index Author ID: 957338.

² ORCID: 0000-0002-0367-5375; Web of Science Researcher ID: ABA-1133-2020; Scopus Author ID: 57215847497; Russian Science Citation Index SPIN-code: 6694-8297; Russian Science Citation Index Author ID: 735873.

✉ ¹ ogurtsov_gl@spbstu.ru.

ABSTRACT

The objective of the study is to develop a method for determining the durability of a reinforced concrete girder of a superstructure when exposed to aggressive environments.

The scientific substantiation of the method is based on the laws of establishing a uniform distribution of atmospheric gas concentrations among homogeneous parts of reinforced concrete and determining the depth of their diffusion. To describe the penetration rate, analytical equations are applied to determine the depth of diffusion of atmospheric gases into concrete. When the diffusion products reach the main reinforcement, corrosion processes start, which cause a decrease in the effective area, and, therefore, a loss of the bearing capacity of the girder of the superstructure during operation of the bridge work.

Keywords: transport construction, durability, service life, bearing capacity, superstructure, bridgework, reinforcement corrosion, aggressive environment.

The proposed calculation method has allowed to build a regression model for assessing durability of reinforced concrete structures depending on the diffusion of aggressive environments and on a variable number of days per year with precipitation. Analysis of the obtained results has shown that when the diffusion products of atmospheric gases reach the main reinforcement, processes of irreversible changes (irreversible decrease) in the bearing capacity of the superstructure begin. It has been established that the service life before failure when exposed to halogens and hydrohalic acids may not exceed 30 years. The application of the method makes it possible to determine the residual service life of the superstructure based on assessment of the bearing capacity resource and to develop regulatory documents on timing of repair work.

For citation: Ogurtsov, G. L., Ermoshin, N. A. Method for Determining Durability of a Bridge Superstructure. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 158–166. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-5>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

Bridge structures are an integral part of highways, the condition of which influences road traffic safety. To prevent critical condition of highway bridges, it is necessary to determine the bearing capacity of their structural elements, considering defects caused by the impact of transport and aggressive environments.

The dependability of reinforced concrete superstructures is in many cases determined by their durability and failure-free operation. A decrease in the bearing capacity of the superstructure because of defects caused by the impact of aggressive environments reduces the service life and is one of the main reasons for premature destruction of bridge structures, causing harm to human life and health, property and the environment. To ensure the working condition of bridge structures, it is necessary to carry out premature repairs, restoration or replacement of failed structural elements [1].

Natural and climatic conditions and man-made factors influence the occurrence of defects in the superstructure that reduce the bearing capacity [2]. Natural and climatic conditions cause gradual aging of materials, a decrease in the modulus of elasticity and tensile and compressive strength of concrete, a decrease in the useful area of reinforcement and, consequently, a loss of bearing capacity and failure of the bridge structure. Man-made factors, first, include changes in the traffic intensity and composition of vehicles. Their impact causes accumulation and development of fatigue deformations and damage, as well as wear of materials of structural elements. At present, regulatory documentation¹² provides that the parameters of a reinforced concrete element (cross-sectional dimensions, reinforcement diameter, compressive strength, etc.) remain unchanged throughout its service life. However, due to the fact that concrete has a capillary-porous structure, the defects of the superstructure arise during operation of the bridge structure which are corrosion of reinforcement, change in the tensile and

compressive strength of concrete, as well as a decrease in the area of main reinforcement under cyclic loading, which leads to a decrease in the bearing capacity of the superstructure girders.

Thus, the *objective* of the study is to develop and substantiate a method for determining durability of a reinforced concrete girder of a bridge superstructure under the influence of aggressive environments, the influence of which leads to degradation of the properties of materials and a decrease in the bearing capacity.

METHODOLOGY

The onset of corrosion of the reinforcement of the superstructure is caused by the process of diffusion of gas contained in the atmosphere into concrete and subsequent depassivation of the reinforcement bars. The depassivation process consists of formation and propagation of transcrystalline (transgranular) cracks deep into the metal with a decrease in the useful area of its cross-section because of simultaneous action of cyclic tensile loads and anodic dissolution of the metal. Diffusion is described by analytical equations of the Fick's first and second laws [3]. The impact of aggressive environments depends on operating conditions of the bridge structure and measures for its maintenance [4; 5]. The degree of influence of the diffusion process is determined by the different composition and concentration of atmospheric gases. The main atmospheric gases interacting with concrete and reinforcement were considered in the studies [6–8]. Carbon dioxide (CO₂), halogens (Cl₂) and hydrohalic acids (HCl) deserve special attention, since when the diffusion front reaches the reinforcement bars, the corrosion process starts [9], which leads to a change in the bearing capacity of the superstructure.

The articles [3; 10; 11] present the results of the studies that determined the rate of carbon dioxide diffusion into concrete samples. The diffusion rate depends on concentration of carbon dioxide on the surface of the samples, the water-cement ratio and the concrete filler used. The depth of carbon dioxide diffusion [3] is determined by formula (1):

$$X_c = \sqrt{2 \cdot D_{CO_2} \cdot a^{-1} \cdot (c_1 - c_2) \cdot \tau_{carb}}, \quad (1)$$

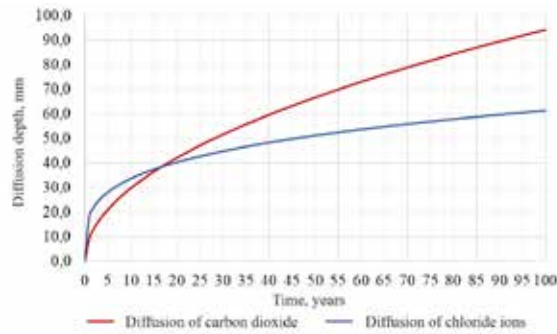
where τ_{carb} is carbon dioxide exposure time, s;

D_{CO_2} – the diffusion coefficient of CO₂ into concrete, m²/s, which depends on the composition of the concrete, the degree of hydration and the moisture content;

¹ SP [Construction rules] 63.13330.2018 Concrete and reinforced concrete structures. Main provisions. [Electronic resource]: https://ano-alpha.ru/upload/iblock/58c/mjvjkirysdmzq31jd53bipez0mxsqd5/SP_63.13330.2018_-2.pdf. Last accessed 01.08.2024.

² SP [Construction rules] 35.13330.2011 Bridges and pipes. [Electronic resource]: [https://www.mos.ru/upload/documents/files/4784/SP35133302011MostiitrybiAktualizirovannayaredakciyaSNiP20503-84\(slzmenenienN1\)_Tekst.pdf?ysclid=m8sod9x4tj580224091](https://www.mos.ru/upload/documents/files/4784/SP35133302011MostiitrybiAktualizirovannayaredakciyaSNiP20503-84(slzmenenienN1)_Tekst.pdf?ysclid=m8sod9x4tj580224091). Last accessed 01.08.2024.





Pic. 1. Diffusion depth of carbon dioxide and chloride ions [developed by the authors].

c_1 and c_2 – respectively, the content of carbon dioxide on the outer surface of concrete and at the carbonation boundary (infinitesimal value), parts per million (ppm);

a – the amount of CO_2 required to convert all carbonisable cement hydration products [12], kg/m^3 , determined by formula (2):

$$a = 0,4 \cdot f \cdot p \cdot C, \quad (2)$$

where f is the degree of neutralisation of concrete, equal to the ratio of the amount of basic oxides that have reacted with carbon dioxide to their total amount in the cement, taken as 0,6;

p – the amount of basic oxides in cement in terms of CaO in relative values by weight according to chemical analysis data, taken as 0,6;

C – numerical equal content of cement in concrete, kg/m^3 .

The diffusion depth of chloride ions [3] is expressed by formula (3):

$$X_{Cl} = \sqrt{4 \cdot D_{Cl0} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\left(\frac{3}{C} - 0,6 \right)} \cdot \left(\text{erf}^{-1} \left(\frac{C_s - C_{crit}}{C_s} \right) \right)^2 \cdot \tau_{Cl}}, \quad (3)$$

where τ_{Cl} – chloride ion exposure time, s;

C_s and C_{crit} – respectively, concentration of chlorides on the surface of the concrete protective layer and the critical concentration of chlorides on the surface of the reinforcement, % by weight of cement;

t_0 and t – age of concrete $t_0 = 28$ days and actual age t , respectively, days;

erf^{-1} – Gaussian error function;

D_{Cl0} – diffusion coefficient of chlorides in concrete [3], m^2/s , determined by formula (4):

$$D_{Cl0} = 10^{(-12,06 + 2,4\sqrt{C})}. \quad (4)$$

Using expressions (1) and (3), graphs of the diffusion depth of carbon dioxide and chloride ions [14] as per years were constructed (Pic. 1) for constant values of formulas (1) and (3). The processes of carbon dioxide and chloride ions penetration occur from the surface of unaffected concrete into the element.

The articles [8; 10; 11; 14] present the results of experimental studies of the effects of carbonation products on the strength of concrete at different concentrations of carbon dioxide. Dependencies have been established indicating that with an increase in the time of accelerated carbonation and concentration of carbon dioxide, the ultimate compressive strength of concrete increases, while there is no information on changes in the ultimate tensile strength. In the process of carbonation [14–17] of concrete, complex polymer intergrowths are formed and there is a lack of visible needle-shaped crystals of calcium hydrosilicate cementing the structure of concrete, which leads to a decrease in cohesion and tensile strength of concrete but increases the compressive strength of concrete. As studies have shown [18], the diffusion of chloride ions leads to a decrease in the compressive and tensile strength of concrete.

When the diffusion products of carbon dioxide and chloride ions reach the reinforcement bars, as well when the acid-base balance of concrete decreases, the corrosion process begins, during which the effective area of the reinforcement bar decreases. Reinforcement corrosion is an electrochemical process that occurs when the alkalinity of the environment decreases to pH values equal to 11, as well as under the action of chloride ions [19; 20]. To describe this process [3], formula (5) is used:

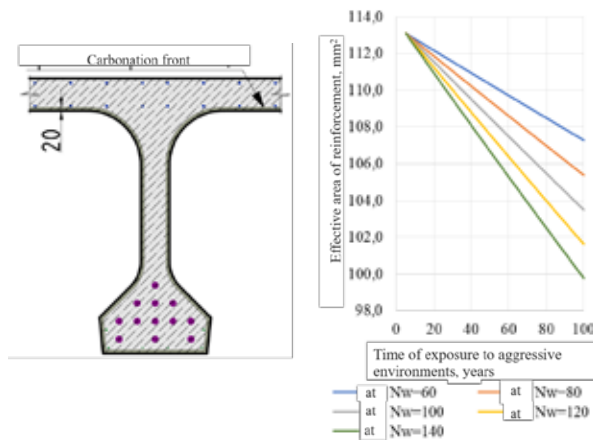
$$A_{cor} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2} - 0,01 \cdot \frac{N_w}{365} \cdot t_{cor} \right)^2, \quad (5)$$

where N_w – number of days per year with precipitation over 2,5 mm;

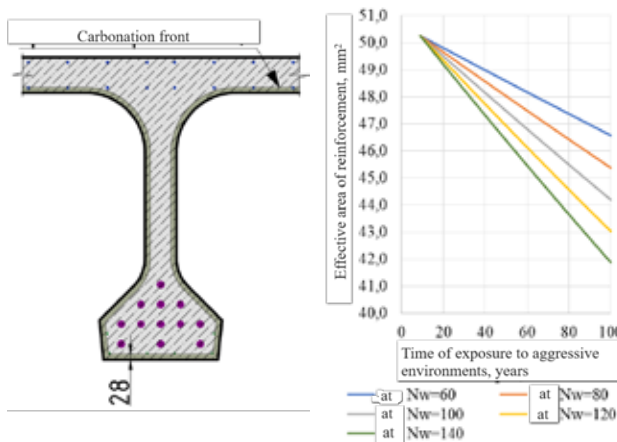
t_{cor} – corrosion time, years.

Once there is a crack with a width of 0.3 mm or more [17], or local damage, the process of reinforcement corrosion accelerates. This process [3] is described by formula (6):

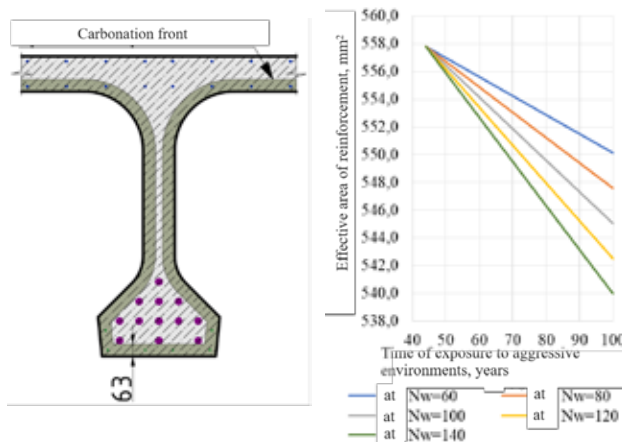
$$A_{cor} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2} - 0,06 \cdot \frac{N_w}{365} \cdot t_{cor} \right)^2. \quad (6)$$



Pic. 2. Distribution of the carbonation front of the cross section after five years [developed by the authors].



Pic. 3. Distribution of the carbonation front of the cross section after nine years [developed by the authors].



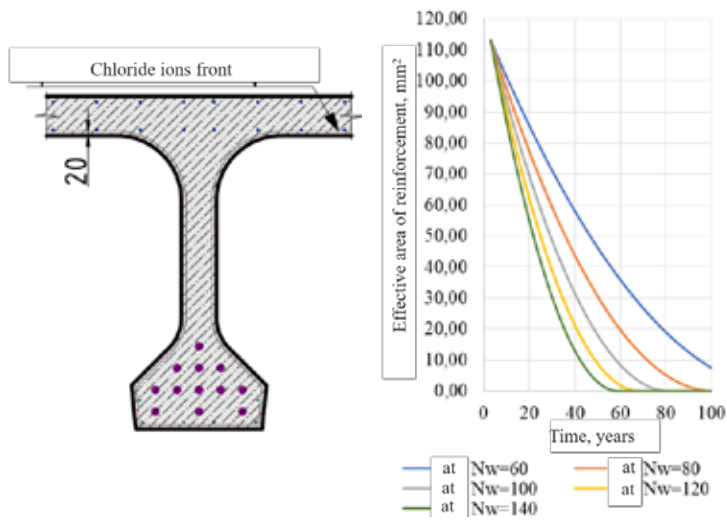
Pic. 4. Distribution of the carbonation front of the cross section after 44 years [developed by the authors].

When chloride ions act on the reinforcement, the corrosion rate increases. The effective area in this case [3] is determined by formula (7):

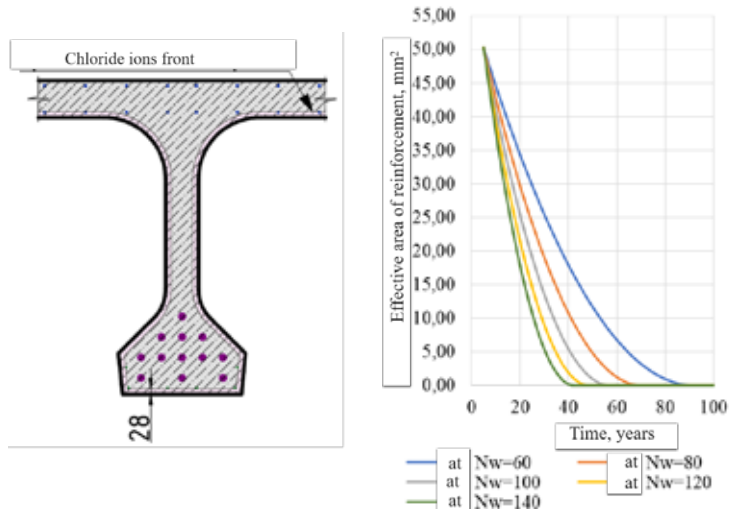
$$A_{cor} = \pi \cdot \left(\frac{d}{2} - 0,28 \cdot \frac{N_W}{365} \cdot t_{cor} \right)^2. \quad (7)$$

This study has considered the cross-section of beam B 3300.b.153-TV of the superstructure corresponding to the working drawings of Soyuzdorproekt. In accordance with dependence (1), it was determined that, when exposed to

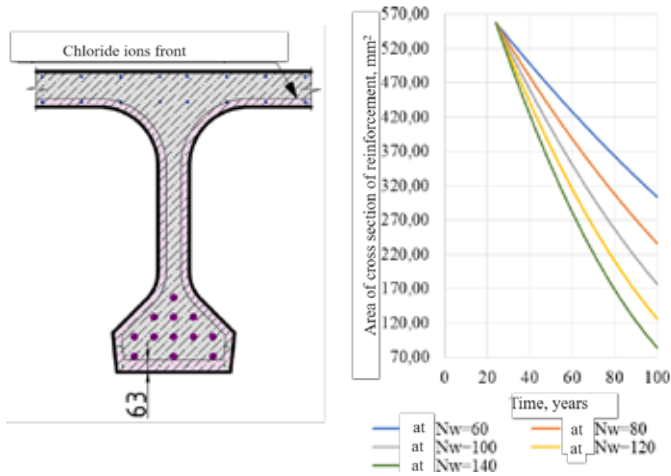




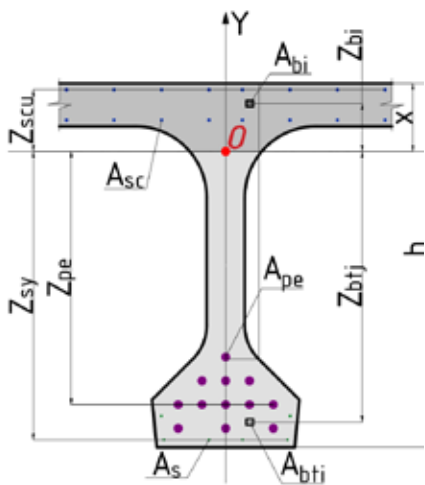
Pic. 5. Distribution of chloride ions in cross section after three years [developed by the authors].



Pic. 6. Distribution of chloride ions in cross section after five years [developed by the authors].



Pic. 7. Distribution of chloride ions in cross section after 24 years [developed by the authors].



Pic. 8. Design scheme of a normal section [developed by the authors].

carbon dioxide, the diffusion front reaches the upper non-stressed main reinforcement (AIII Ø12) of the superstructure within five years (Pic. 2) and the lower non-stressed reinforcement (AI Ø8) within nine years (Pic. 3). Corrosion of the prestressed reinforcement (K7 24Ø5V) begins 44 years after the commissioning of the structure (Pic. 4). The change in the effective area during corrosion is described by a quadratic dependence, but due to the small change in the reinforcement diameter, it proceeds slowly, approaching a linear dependence (see Pics. 2–4).

During the service life of the superstructure, the diffusion of chloride ions results in beginning of corrosion of the upper and lower non-stressed reinforcement at the age of three and five years, respectively (Pics. 5 and 6), and of the prestressed reinforcement at the age of 24 years (Pic. 7) because of crack opening [3].

Substantiation of the patterns of change within the area of reinforcement bars because of the carbonation process allows us to proceed to determining the bearing capacity of reinforced concrete structures.

Calculation of the ultimate bending moment is performed based on the strength of the normal section of the reinforced concrete superstructure. In this model, ultimate forces are taken for compressed concrete, equal to the compressive resistance R_b ; for tensioned concrete, equal to the tensile resistance R_{bt} ; for tensioned longitudinal non-stressed reinforcement, equal to the tensile resistance R_s ; for compressed longitudinal non-stressed reinforcement, equal to R_{sc} , for

prestressed longitudinal reinforcement, equal to the tensile resistance R_p . The compressive and tensile resistances of concrete are assumed to be uniformly distributed over the compressed and tensioned zones.

The normal section (Pic. 8) is divided into a set of elements of area with a step S .

The ultimate forces created on the elements of area are applied to the centre. The solution to the problem is reduced to finding the position of point «O», which is located on the boundary of the compressed and stretched zones. Since the problem is axisymmetric, point «O» is located on the vertical axis of the normal section.

The ultimate bending moment of a normal section is determined by formula (8), which is obtained by solving the equation of equilibrium of moments relative to point «O»:

$$\sum_{i=1}^n R_b \cdot A_{bi} + \sum_{u=1}^p R_{sc} \cdot A_{scu} - \sum_{j=1}^m R_{bt} \cdot A_{btj} - \sum_{y=1}^k R_s \cdot A_{sy} - \sum_{e=1}^l R_p \cdot A_{pe} = 0 \quad (8)$$

where Z_{bi} is the arm of action of the force for the i -th element of area of compressed concrete, mm;

Z_{scu} – arm of action of force for the u -th compressed reinforcement, mm;

Z_{btj} – arm of action of the force for the j -th element of area of stretched concrete, mm;

Z_{sy} – arm of action of force for the y -th tensile reinforcement, mm;

Z_{pe} – arm of action of force for the p -th prestressed reinforcement, mm;

A_{bi} , A_{scu} , A_{btj} , A_{sy} , A_{pe} – areas of elements of area of compressed concrete, compressed reinforcement, tensioned concrete, tensioned reinforcement and prestressed reinforcement, respectively, mm².

The arms of action of forces are deterministic quantities that are determined by the formulas (9–13):

$$Z_{bi} = x - 10 \cdot a_p \quad (9)$$

$$Z_{btj} = 1530 - x - 10 \cdot b_j \quad (10)$$

$$Z_{scu} = x - Z_u \quad (11)$$

$$Z_{sy} = 1530 - x - Z_y \quad (12)$$

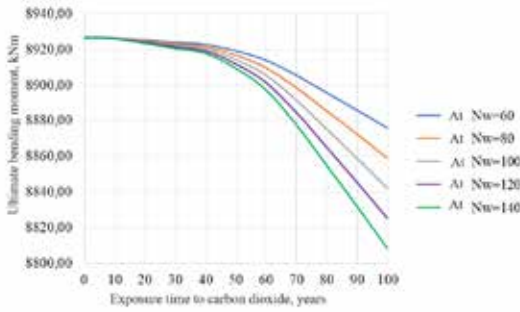
$$Z_{pe} = 1530 - x - Z_e \quad (13)$$

where x – actual height of compressed zone, mm;

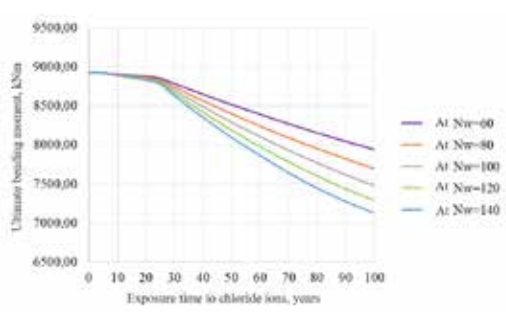
a_p , b_j – ordinal number of the horizontal row of compressed and stretched elements of area, respectively;

Z_u , Z_y , Z_e – distances from the centres of compressed, stretched and prestressed reinforcement to the nearest edge of the element, mm.

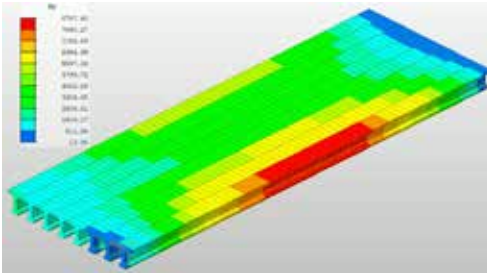




Pic. 9. Change in ultimate bending moment under the influence of carbon dioxide and for different number of days with precipitation per year [developed by the authors].



Pic. 10. Change in ultimate bending moment under the influence of chloride ions and for different number of days with precipitation per year [developed by the authors].



Pic. 11. Bending moment diagram M_y , kN·m [developed by the authors].

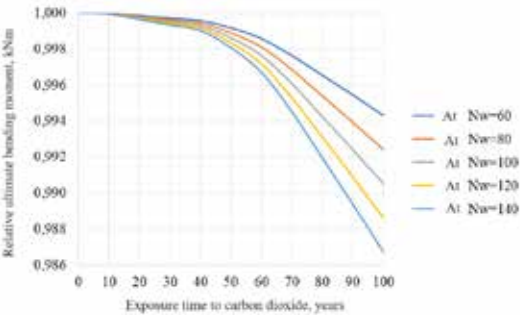
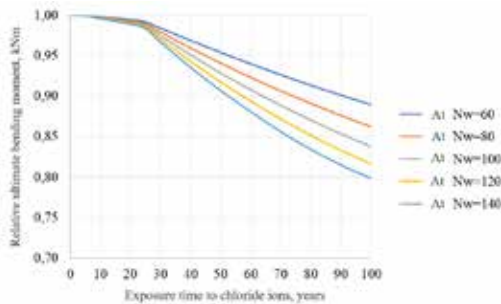


Рис. 12. Изменение относительного предельного изгибающего момента при воздействии углекислого газа и разным количестве дней с осадками в год [разработано авторами].



Pic. 13. Change in relative ultimate bending moment under the influence of chloride ions and different number of days with precipitation per year [developed by the authors].

The areas of elements of area of a normal section are constant values for a certain moment in time.

When determining the ultimate bending moment, condition (14) must be satisfied, which is obtained by solving the equation of equilibrium of forces on the longitudinal axis (orthogonal to the plane of the normal section) of the element:

$$\sum_{i=1}^n R_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_{u=1}^p R_{scu} \cdot A_{scu} - \sum_{j=1}^m R_{bj} \cdot A_{bj} - \sum_{y=1}^k R_{sy} \cdot A_{sy} - \sum_{e=1}^l R_{pe} \cdot A_{pe} = 0 \quad (14)$$

The calculation of the normal cross-section over time is performed in accordance with formulas (8) and (14). The values of the effective area of the main reinforcement are determined in accordance with Pics. 2–7 for a specific moment in time. The results of the calculations are shown in Pic. 9 for different amounts of precipitation during the year under the influence of carbon dioxide, and in Pic. 10 under the influence of chloride ions.

RESULTS

To determine the forces that arise, a modelling of a sectional superstructure made using 3300.b.153-TV girders was performed. When a moving load is located above the girder in the centre of the suoerstructure, a bending moment $M_y = 8787,90$ kN·m is created (Pic. 11).

The analysis of the obtained results (see Pics. 9, 10) showed that when the main reinforcement is reached, the processes of irreversible changes (irreversible decrease) in the bearing capacity of the superstructure begin. In the process of carbon dioxide diffusion, the reinforcement bars corrode, which leads to a decrease in the bearing capacity of the superstructure girders. Before the onset of corrosion of the prestressed reinforcement (45

years), a loss of 0,03 % of the initial bearing capacity of the superstructure girder is observed, and after 45 years the loss is 0,52 %.

The rationale of the forecasting formula for the current ultimate bending moment is based on the graphs shown in Pics. 12, 13.

The value of the ultimate bending moment for a beam exposed to carbon dioxide for a time t and for the number of days per year with precipitation greater than 2,5 mm N_w is determined by the formula (15):

$$M_t = M_{y,0} \cdot (1 - 0,13 \cdot N_w \cdot t^2 \cdot 10^{-7} + 0,04 \cdot N_w \cdot t \cdot 10^{-5}), \quad (15)$$

where t – actual time of exposure of the span structure to carbon dioxide;

N_w – number of days per year with precipitation over 2,5 mm;

$M_{y,0}$ – initial value of ultimate bending moment, kNm.

A decrease in the bearing capacity indicates a negative impact of carbon dioxide diffusion. During operation, measures should be taken to prevent the diffusion of atmospheric gases through painting the concrete surface and using additives that compact the structure. Also, it is necessary to control and replace the affected concrete before the front reaches the prestressed reinforcement. After the onset of corrosion of the prestressed reinforcement, an irreversible process of reducing the operational properties occurs, while the bending moment from the action of the moving load does not exceed the limit value during the service life. Failures of the superstructure girders occur at the age of 105; 117; 126; 139 and 158 years.

During operation of the superstructure, chloride ions reach the prestressed reinforcement because of the opening of cracks formed during corrosion of the non-prestressed lower reinforcement and a decrease in the strength of the concrete. Corrosion of the upper and lower non-prestressed reinforcement begins at the age of three and five years, respectively, and of prestressed reinforcement at 24 years. The rate of corrosion under the influence of chloride ions is 28 times higher than under the influence of carbon dioxide, but the penetrating ability is lower. Before the onset of corrosion of the prestressed reinforcement (24 years), a loss of 0,72 % of the initial bearing capacity of the superstructure girder is observed, after 24 years the loss is 9,84 %.

The value of the ultimate bending moment for a girder exposed to chloride ions for a time t

and the number of days per year with precipitation greater than 2,5 mm N_w is determined by formula (16):

$$M_t = M_{y,0} \cdot (1 - 0,82 \cdot N_w \cdot t^2 \cdot 10^{-7} - 0,12 \cdot N_w \cdot t \cdot 10^{-4}), \quad (16)$$

where t is actual time of exposure of the superstructure to carbon dioxide;

N_w – number of days per year with precipitation over 2,5 mm;

$M_{y,0}$ – initial value of ultimate bending moment, kNm.

During operation of a bridge structure with a predominant effect of chloride ions, it is necessary to prevent the occurrence of cracks that will result in corrosion of the prestressed reinforcement. Failures of the superstructure girders occur at the age of 25; 26; 27; 28 and 30 years.

CONCLUSIONS

This study has proposed a method for determining the service life of a reinforced concrete girder of a bridge superstructure under the influence of aggressive environments. The proposed method consists of six stages:

1. Revealing the prevailing effect of an aggressive environment.
2. Determining the diffusion rate of atmospheric gases.
3. Determining the change in the effective cross-sectional area of reinforcement.
4. Evaluating of the bearing capacity of the superstructure girder at the beginning of operation.
5. Calculating of the current ultimate bending moment of the girder.
6. Determining residual service life.

The analytical dependences of the diffusion of atmospheric gases (carbon dioxide (CO₂), halogens (Cl₂) and hydrohalic acids) constituted a basis to determine the dependences of the ultimate bending moments of the superstructure's girder for various operating conditions. The number of days with precipitation during the year has been chosen as the main influencing condition.

The proposed method has been used to calculate the bearing capacity of the B 3300.b.153-TV reinforced concrete girder of the superstructure. It has been established that its service life before failure when exposed to carbon dioxide is 158 years, and when exposed to halogens and hydrohalic acids – 27 years.





Thus, the use of this method allows determining the remaining service life of the superstructure, as well as the resource for bearing capacity and predicting the required repair and restoration work.

REFERENCES

1. Gulitskaya, L. V., Shimanskaya, O. S. An analysis of the technical and operational condition of plate concrete superstructures of highway bridges [Analiz tekhniko-ekspluatatsionnogo sostoyaniya zhelezobetonnykh proleynykh stroenii avtodorozhnykh mostovykh sooruzhenii]. *Transport. Transport facilities. Ecology*, 2017, Iss. 1, pp. 35–45. DOI: 10.15593/24111678/2017.01.03.
2. Karapetov, E. S., Belyi, A. A. Methods for assessing technical and operational performance of reinforced concrete bridge structures in St. Petersburg [Metody otsenki tekhniko-ekspluatatsionnykh pokazatelei zhelezobetonnykh mostovykh sooruzhenii Sankt-Peterburga]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta puti soobshcheniya*, 2009, Iss. 2 (19), pp. 177–187. EDN: KVKFKX.
3. Boroday, D. I. Forecast of durability of typical reinforced concrete slab span structures of road bridges [Prognoz dolgovechnosti tipovykh zhelezobetonnykh plitnykh proleynykh stroenii avtodorozhnykh mostov]. *Bulletin of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2011, Iss. 1 (87), pp. 169–176. EDN: FCCMZB.
4. Talipova, L. V., Shonina, E. V. Determination of carbon footprint in construction [Opredelenie uglerodnogo sleda v stroitelstve]. In: *Engineering tasks: problems and solutions [Inzhenerye zadachi: problem i puti resheniya]: Proceedings of II All-Russian (national) scientific and practical conference*. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, 2021, pp. 99–102. EDN: BSQSGN.
5. Ovchinnikova, T. S., Marinin, A. N., Ovchinnikov, I. G. Corrosion and anti-corrosion protection of reinforced concrete bridge structures [Korroziya i antikorroziionnaya zashchita zhelezobetonnykh mostovykh konstruksii]. *Internet journal «Naukovedenie»*, 2014, Iss. 5 (24), p. 11. EDN: TKELFZ.
6. Nikonorov, A. N., Zaitsev, A. A. Protection of bridge structures from atmospheric corrosion [Zashchita mostovykh konstruksii ot atmosferno korrozii]. *Problemy nauki*, 2020, Iss. 1 (49), pp. 12–15. EDN: XKAREB.
7. Kozlova, V. K., Kalko, I. K., Zavadskaya, L. V., Manokha, A. M., Wolf, A. V., Khomutov, E. S. Determination of the degree of corrosion destruction of reinforced concrete bridge structures [Opredelenie stepeni korrozionnogo razrusheniya mostovykh zhelezobetonnykh konstruksii]. *Polzunovskiy almanac*, 2023, Iss. 1, pp. 63–66. EDN: MUGTWX.
8. Molodin, V. V., Anufrieva, A. E., Leonovich, S. N. Influence of Carbonization of Concrete Surfaces on their Adhesion with Freshly-Laid Concrete. *Science and Technique*, 2021, Vol. 20, Iss. 4, pp. 320–328. DOI: 10.21122/2227-1031-2021-20-4-320-328.
9. Moraru, C., Apostu, A., Georgescu, D. Carbonation Resistance Classes of Concretes. *Romanian journal of transport infrastructure*, 2021, Vol. 10, Iss. 1, pp. 50–65. DOI: <https://doi.org/10.2478/rjti-2021-0004>.
10. Al Fuhaid, A. Effects of fine Aggregates, Cicopowder-WP, and Styrene-Butadiene rubber on carbonation resistance in concrete. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.781>. [Article in press].
11. Chen Ying, Liu Peng, Yu Zhiwu, Li Siyang, Hu Cheng, Lu Dapeng. Research on the performance evolution of concrete under the coupling effects of sulfate attack and carbonation. *Journal of materials research and technology*, 2023, Vol. 26, pp. 4670–4695. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.08.206>.
12. Troyan, V. V. Modelling the durability of reinforced concrete structures [Modelirovanie dolgovechnosti zhelezobetonnykh konstruksii]. *Tekhnologii budochnosti*, 2011, Iss. 5–6 (58–59), pp. 39–41. EDN: TKANWZ.
13. Yin Shen, Yi Wang, Xiaoqing Xu, Feipeng Ruan. Study on carbonation of construction joints through field tests on a 30-year-old bridge and accelerated carbonation tests. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, Vol. 19, e02231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02231>.
14. Maohua Zhang, Lin Du, Zhiyi Li, Ronghua Xu. Durability of Marine Concrete Doped with Nanoparticles under Joint Action of Cl- Erosion and Carbonation. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, Vol. 18, e01982. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01982>.
15. Xupeng Ta, Zhijun Wan, Yuan Zhang, Shubing Qin, Jiale Zhou. Effect of carbonation and foam content on CO2 foamed concrete behavior. *Journal of materials research and technology*, 2023, Vol. 23, pp. 6014–6022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.178>.
16. Bastidas-Arteaga, E., Rianna, G., Gervasio, H., Nogal M. Multi-region lifetime assessment of reinforced concrete structures subjected to carbonation and climate change. *Structures*, 2022, Vol. 45, pp. 886–899. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.09.061>.
17. Konečný, P., Lehner, P. Durability assessment of concrete bridge deck considering waterproof membrane and epoxy-coated reinforcement. *Perspectives in Science*, 2016, Vol. 7, pp. 222–227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2015.11.036>.
18. Song Gao, Jia Guo, Yaoyao Gong, Shunli Ban, Ang Liu. Study on the penetration and diffusion of chloride ions in interface transition zone of recycled concrete prepared by modified recycled coarse aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, Vol. 16, e01034. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01034> [full text of the issue].
19. Krivtsova, O. N., Andreyashchenko, V. A., Panin, E. A., Frants, Yu. Yu. Corrosion of reinforcing steel in the post-rolling period: causes and methods of its protection [Korroziya armaturnogo prokata v postprokatniy period: prichiny i sposoby ego zashchity]. *Trudy universiteta*, 2018, Iss. 3 (72), pp. 93–96. EDN: YLXYQX.
20. Kazakov, V. A., Popov, V. A., Kosach, A. F. Atmospheric corrosion of reinforcement in reinforced concrete structures [Atmosferная korrozija armatury v zhelezobetonnykh konstruksiyakh]. In: *Architecture, construction, transport: materials of the International scientific and practical conference (to the 85th anniversary of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «SibADI»*, Omsk, 02–03 December 2015. Omsk, SibADI, 2015, pp. 275–280. EDN: VMRSQZ.

Information about the authors:

Ogurtsov, Gleb L., Assistant Lecturer at the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, ogurtsov_gl@spbstu.ru.

Ermoshin, Nikolay A., D.Sc. (Mil. Sc.), Professor at the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia, ermoshin_na@spbstu.ru.

Article received 24.01.2024, approved 10.09.2024, accepted 12.09.2024.



MANAGEMENT, CONTROL AND ECONOMICS



SEA PORTS 168

Econometric model of cargo turnover.

REGIONAL LOGISTICS 178

Transport warehousing centres: spatial model and its impact on regional development.



MUNICIPAL ROUTES 185

Methods to select routes for electric buses.

SUBURBAN RAILWAYS 193

Methodology of classification.

RAILWAYS 200

Number of wagons in the train and connected factors influencing power consumption.



CIVIL AVIATION 208, 218, 227

Development of corporate strategies.

Components of prime cost and a model of their effects on rates' changes.

Digital outlook for air transportation.





Econometric Model for Forecasting Cargo Turnover at Seaports



Marina V. BOTNARYUK



Natalia N. KSENZOVA

Marina V. Botnaryuk¹, Natalia N. Ksenzova²

^{1,2} Admiral Ushakov State Maritime University,
Novorossiysk, Russia.

¹ ORCID: 0000-0001-6570-9561; Russian Science
Citation Index SPIN-code: 9134-4799; Russian Science
Citation Index Author ID: 760991.

² ORCID: 0000-0003-1172-5675; Russian Science
Citation Index SPIN-code: 3166-8695; Russian Science
Citation Index Author ID: 887997.

✉ ¹ mia-marry@mail.ru.

ABSTRACT

The seaport, being a complex economic system, meets the needs of a country's economy in sea transportation. Being in close interaction with railway and road transport, seaports take an active part in solving the problem of delivering goods to the end consumer. Seaports also participate in replenishing national budget and develop trade relations of a state, strengthening its status on the world stage. In this regard, forecasting the cargo turnover of the seaport can be considered one of the most important tasks.

The objective of the study is to build and substantiate a model for forecasting the performance of seaports, reflecting the dependence of the cargo turnover of the port industry on the main macroeconomic indicators.

The object of this study refers to Russian domestic seaports. The study has applied methods of analysis, synthesis, content

analysis of sources and statistical data, including industry data, for several years, which substantiates the reliability of the results obtained. Constructing an econometric model has been based on the methods of correlation and variance analysis, as well as of least squares.

The novelty of the study refers to the application of a system of recursive equations as a forecast model for the cargo turnover of seaports, where determining factors of cargo turnover, as a result feature, are lagged dependent variables for the previous period.

The developed econometric model can be used for short-term forecasting of cargo turnover in the seaport industry, as well as for assessing its dependence on situation and level of development of foreign economic activity and the entire national economy.

Keywords: port industry, cargo turnover, econometric model, system of recursive equations, autoregression with distributed lags, short-term forecasting.

For citation: Botnaryuk, M. V., Ksenzova, N. N. Econometric Model for Forecasting Cargo Turnover at Seaports. *World of Transport and Transportation*, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 168–177. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-6>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

The functioning of economic systems under the conditions of uncertainty and instability of the external environment has always been considered one of the key problems in the field of strategic planning. In this regard, for several decades many researchers have devoted their works to solving the problem of creating models for forecasting development of both the national and global economies, and of individual business units. For example, the work [1] reflects the issues of constructing models for forecasting economic indicators, without which it is difficult to determine the trajectory of strategic planning of an enterprise. Researchers like V. A. Kryukov and others [2] deal with problematic issues of tools of macroeconomic, interregional and intersectoral analysis and forecasting. However, those models do not consider to full extent the specifics of individual sectors of the national economy, which in some circumstances is one of the most important criteria for selecting a model. In this regard, a model attracts attention proposed by T. L. Samkov, who has revealed the dependence of the forecast of the gross domestic product on the total impact of the volumes and cost of derivatives of exchange transactions on the sale of the most important fuel and energy products and raw materials [3].

The transport industry, notably the maritime transport industry, is of particular importance for development of the domestic economy, as well as domestic and foreign trade, since it meets the needs of the national economy in transportation. Research conducted by a group of authors [4–6] clearly demonstrates the relationship between world trade and sea transport, which justifies the need to build models that make it possible to forecast cargo turnover and, accordingly, plan operation of the transport system depending on key macroeconomic factors. The dependence of maritime trade volumes on development of both the national and global economies is also reflected in the works of many domestic and foreign researchers [7–9].

In this regard, of interest is the research article [10], which is devoted to the issues of constructing logistic models of oil transportation. The analysis of scientific publications devoted to this topic showed a wide variety of approaches and methods used in developing forecasts for development of sea transportation and the cargo portfolio of seaports. For example, Yu. M. Krakovsky and T. Davaanyam are

engaged in comprehensive forecasting of basic indicators of the transportation process [11]. In the work [12], a scenario approach is used to forecast the basic indicators of the transportation process. Other authors propose creating hybrid systems of forecasting models, as well as intelligent models, including artificial neural networks [13]. The studies of D. A. Macheret and R. A. Titov are aimed at obtaining results in strategic planning of development of intermodal transport infrastructure [14]. Also, many authors use econometric models to model and forecast the demand for cargo transportation [15] and indicators of exports of goods from the Russian Federation [16]. The features of forecasting multidimensional non-stationary time series using neural modelling are shown in the work [17]. Econometric modelling methods have found wide application in forecasting the development of sea transport in the works of authors worldwide [18–19].

Having summarised the above, the authors set *the objective* of constructing an econometric model that will reflect the dependence of the cargo turnover of seaports on the main macroeconomic indicators characterising the development of the country's economy.

RESEARCH METHODS

The study has resulted in construction of an econometric model of the dependence of seaport cargo turnover on the main macroeconomic indicators characterising the development of the country's economy. Those indicators comprised the volume of industrial production of Russia (IP), the country's foreign trade turnover (FTT), indicators of oil production and export, the industrial production index (IPI), as well as the world price of oil and the volume of world sea cargo transportation.

The information base of this study consisted of data of the Federal State Statistics Service, the Association of Sea Trade Ports, as well as data from the UNCTAD (UN Conference on Trade and Development) for the period from 2000 to 2022. A time interval of 23 years is quite sufficient to obtain reliable modelling results. Table 1 presents the matrix of paired correlation coefficients.

The analysis of the given coefficients of pair and interfactor correlation allowed to identify dependencies between the indicators. A close relationship was established between the cargo turnover of ports and foreign trade turnover, with



Table 1

Matrix of paired correlation coefficients (compiled by the authors)

	Cargo turnover of ports	FTT	World oil price	Volume of sea transportation	Oil production volume	Oil export	IPI	IP
Cargo turnover of ports	1							
FTT	0,78006	1						
World oil price	0,39046	0,61031	1					
Volume of sea transportation	0,98732	0,35628	0,46302	1				
Oil production volume	0,80778	0,79408	0,59408	0,88856	1			
Oil export	0,77895	0,93061	0,91431	0,53733	0,69191	1		
IPI	-0,25629	-0,23199	-0,16080	-0,24581	-0,27402	-0,15166	1	
IP	0,76810	0,87829	0,51883	0,46517	0,89420	0,40410	-0,17434	1

the correlation coefficient was 0,78006; between cargo turnover and the volume of world sea transportation with the closeness of the relationship of 0,93061. At the same time, a strong relationship is clearly traced between foreign trade turnover and the volumes of industrial production and oil exports.

As a result, a system of recursive equations can be preliminarily proposed as an econometric model for forecasting the cargo turnover of seaports which takes the form:

$$Y_1 = f(X_1, X_2), \quad (1)$$

$$Y_2 = f(Y_1, X_3), \quad (2)$$

where Y_1 – foreign trade turnover, billion dollars, is considered as a variable dependent (endogenous) on the volume of industrial production and oil exports;

Y_2 – cargo turnover of seaports, million tons, is considered as a variable dependent (endogenous) on the indicator of foreign trade turnover and the volume of world sea transportation.

X_1 – industrial production volume, billion dollars, independent (exogenous) variable;

X_2 – annual volume of oil exports, billion dollars, independent (exogenous) variable;

X_3 – volume of world sea cargo transportation, million tons, independent (exogenous) variable.

As a result, the proposed system of dependencies is a system of recursive equations, in which the endogenous variable Y_2 includes the dependent variable Y_1 as a factor along with the independent variables X_1 , X_2 and X_3 . Since the initial data are time series, they must be tested for stationarity. In case of a non-stationary time series, it must be reduced to

a stationary form by eliminating the cyclical component (if any) from the levels of the series and excluding the trend. Within the system, each equation is considered as an independent regression equation, and its parameters are estimated using the least squares method. The modelling process is accompanied by an assessment of the quality and significance of both the parameters of the resulting model and of the entire econometric model.

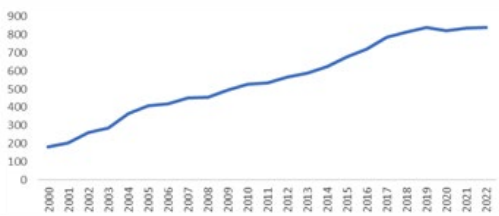
RESEARCH RESULTS

When modelling the relationships of dynamic series, the requirement of their stationarity must be met, i.e., there must be no trend or cyclical fluctuations in them. Visual analysis of the graphs of the initial data presented in Pics. 1–5 as well as determination of the autocorrelation coefficients of the levels of the dynamic series allow us to conclude that there is a trend in all the series under consideration.

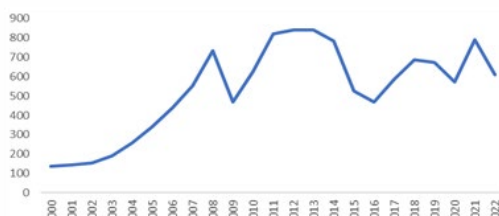
The pictures then show the dynamics of Russia's foreign trade turnover, IP and oil export indicators, as well as the volume of world sea transportation for the period 2000–2022.

The presence of the trend is also confirmed by the autocorrelation functions of the levels of the dynamic series shown in Table 2.

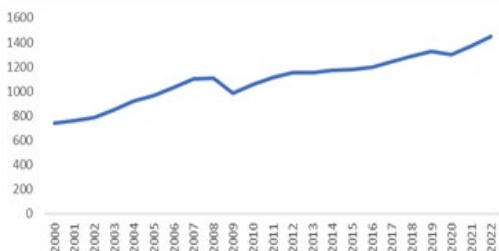
The highest values of the first-order autocorrelation coefficients indicate, first, the presence of a trend in the dynamic series of the indicators under consideration and, second, the absence of periodic fluctuations in them. A trend in the dynamic series may be the reason for the presence of the so-called false correlation between the indicators under consideration. The



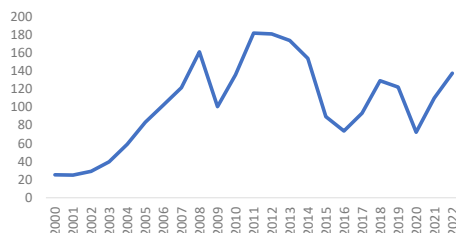
Pic. 1. Dynamics of cargo turnover of Russian seaports for the period 2000–2022 [compiled by the authors based on the data of Maritime News of Russia. [Electronic resource]: <https://morvesti.ru>. Last accessed 10.10.2023].



Pic. 2. Dynamics of Russia's foreign trade turnover for the period 2000–2022 [compiled by the authors based on the World imports of goods and services: 1970–2023. [Electronic resource]: <https://global-finances.ru>. Last accessed 10.10.2023].



Pic. 3. Dynamics of industrial production volumes in Russia for the period 2000–2022 [compiled by the authors based on the World imports of goods and services: 1970–2023. [Electronic resource]: <https://global-finances.ru>. Last accessed 10.10.2023].



Pic. 4. Dynamics of oil export volumes for the period 2000–2022 [compiled by the authors based on the World imports of goods and services: 1970–2023. [Electronic resource]: <https://global-finances.ru>. Last accessed 10.10.2023].

influence of the time factor will be reflected in the correlation dependence on the values of random errors ε_t , presented in the form of autocorrelation coefficients in the residuals. Therefore, an additional assessment of both the presence and strength of the relationship, as well as the significance and reliability of the obtained modelling results is required.

When constructing the econometric model, the performed check showed that the equations of the system are identifiable. In this regard, the two-step least squares method will be used for the solution in this article. The OLS model [22] was chosen as a model for the dependence of foreign trade turnover on the volumes of industrial production and oil exports:

$$Y_t = a + b_1 X_{1t} + b_2 X_{2t}, \quad (3)$$

where a , b_1 and b_2 are parameters of regression equation.

The model is solved using Microsoft Excel. The parameters and indicators for constructing the OLS model are shown in Table 3.

According to the Student's criterion and Fisher's F-criterion, the calculated values of which exceed their tabulated values, and according to the high value of the determination index, it can be stated that this multiple regression equation reliably describes the dependence of the studied indicators.

Thus, the regression model of the dependence of the foreign trade turnover indicator on the volume of industrial production and oil exports takes the form:

$$Y_t = -275,494 + 0,4063X_{1t} + 3,4659X_{2t} + \varepsilon_t. \quad (4)$$

The application of the least squares method requires compliance with certain requirements – the assumptions of the least squares method regarding the random variable ε :

Table 2

Autocorrelation functions of time series [compiled by the authors]

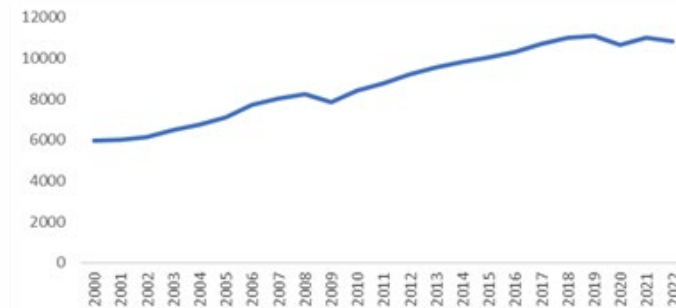
Lag	Autocorrelation coefficients of time series levels				
	Cargo turnover of ports (Y_{2t})	Foreign trade turnover (Y_1)	Industrial production volume (X_1)	Oil exports (X_2)	World sea transportation (X_3)
1	0,994781	0,833217	0,971767	0,786571	0,989384
2	0,987086	0,694483	0,934653	0,525941	0,978356
3	0,973855	0,577053	0,918512	0,386775	0,965031
4	0,96252	0,435739	0,896265	0,208981	0,96001
5	0,957859	0,304595	0,865891	0,032208	0,958601



Table 3

Parameters and indicators for constructing the OLS model [compiled by the authors]

Correlation analysis					
Multiple correlation coefficient (R)					0,969321
Index of multiple determination (R ²)					0,939583
Adjusted index of multiple determination (\widehat{R}^2)					0,933542
Standard error of a variable Y					60,431017
Number of observations					23
Analysis of variance					
	<i>Number of degrees of freedom</i>	<i>Dispersion</i>	<i>Variance per degree of freedom</i>	<i>Calculated Fisher F-criterion</i>	<i>Calculated significance level of Fisher F- criterion</i>
Factor regression	2	1135882,596	567941,297	155,519	6,47918E-13
Residual regression	20	73038,157	3651,907		
General regression	22	1208920,753			
Regression analysis					
	<i>Parameters of the regression equation</i>	<i>Standard error of a variable</i>	<i>Calculated Student's t-criterion</i>	<i>Calculated significance level of the Student's t- criterion</i>	
Result variable Y ₁	-275,493989	75,860589	-3,631582	0,001661791	
Factor variable X ₁	0,406330	0,082354	4,933921	8,00174E-05	
Factor variable X ₂	3,465934	0,329692	10,512613	1,35614E-09	



Pic. 5. Dynamics of world sea transportation volumes for the period 2000–2022 [compiled by the authors based on the Maritime News of Russia. [Electronic resource]: <https://morvesti.ru>. Last accessed 10.10.2023].

– randomness of the residuals' fluctuations, which represent a time series of residual sequence levels;

– the mathematical expectation (average value) of the residuals ε_i is zero;

– the residuals of the time series must be homoscedastic, i.e., there should be the same dispersion of ε_i for all variables x_i ;

– there must be no autocorrelation in the residuals ε_i ;

– the distribution of the residuals must obey the normal distribution law.

The data for checking the assumptions of the least squares method are given in Table 4.

Pic. 6 shows a graph of the dependence of random errors ε_i on the calculated $Y_{i(X)}$ for the

purpose of testing the first requirement of the least squares method.

Visual analysis of the correlation field of residuals ε_i , which are located within the boundaries of the horizontal line, is the evidence of the randomness of the residual deviations, therefore, the first requirement of the least square method is met: the calculated values of the resulting indicator «foreign trade turnover» well approximate its empirical values.

The second requirement of the least squares method regarding the mathematical expectation of the residuals means that $\sum(Y_i - Y_{i(X)})^2 = 0$. The sum of the residuals for the studied dependence was 2,50111E-12, practically equal to zero, which means the second assumption is rationale.

Table 4

Definition of random residuals ε_i for Y_i [compiled by the authors]

Obser-vation	Actual Y_i	Theoretical $Y_{i(x)}$	Residuals ε_i	Obser-vation	Actual Y_i	Theoretical $Y_{i(x)}$	Residuals ε_i
1	136,9	111,9642	24,9357	13	842	818,7929	23,2070
2	141,8	119,6901	22,1099	14	842,2	795,4992	46,7008
3	152,9	143,5354	9,36458	15	784,4	734,9523	49,4476
4	191	208,4498	-17,4497	16	526,4	513,0122	13,3877
5	257,1	303,301	-46,2009	17	468,1	466,6123	1,4876
6	340,2	406,9176	-66,7175	18	585,1	552,758	32,3419
7	439,1	497,0251	-57,9251	19	688,1	694,6048	-6,5047
8	551,7	592,066	-40,3659	20	672	688,1707	-16,1707
9	734,7	732,1343	2,5657	21	572,6	504,018	68,5819
10	469	474,2153	-5,2153	22	789,4	662,9137	126,4862
11	625,1	625,4944	-0,3943	23	611	790,6586	-179,6585
12	822,5	806,5141	15,9858	Сymma			2,50111E-12

The third requirement of the least squares method (homoscedasticity of the residuals) is also met, which follows from the same graph shown in Pic. 6. In the graph, the residuals ε_i are located along a straight line (axis $Y_{i(x)}$), which is a clear sign of homoscedasticity.

The fourth assumption of the least squares method is about the absence of autocorrelation of the residuals, i.e., about the absence of dependence between individual levels of the dynamic series of residuals, confirms the consistency and efficiency of the found parameters of the regression equation. Since the construction of the econometric model is carried out based on dynamic series, which, as a rule, contain a trend – this is the dependence of the subsequent level of the dynamic series on the previous one, the fulfilment of this assumption is mandatory when conducting relevant studies. Therefore, two tests for checking the autocorrelation of residuals were used in the work: constructing the autocorrelation function and using the Durbin–Watson test. Using Microsoft Excel, the coefficients of autocorrelation

of residuals (autocorrelation function) of the regression equation were calculated, the values of which are given in Table 5.

Low values of the indicators allow us to conclude that there is no autocorrelation of residuals in the considered linear equation of multiple regression.

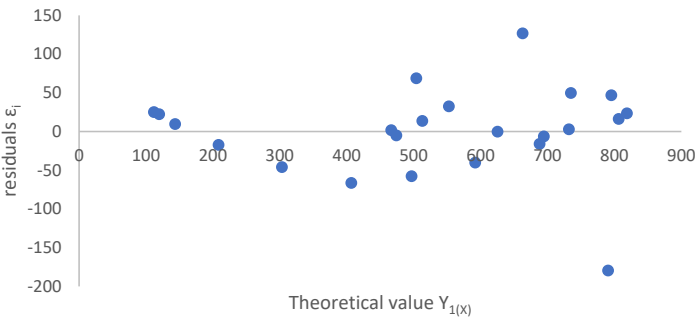
The Durbin–Watson criterion makes it possible to verify the absence of autocorrelation of the residuals. To apply it, the value of d was calculated using the formula:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \tag{5}$$

For the calculated multiple regression equation, the actual value of the Durbin–Watson criterion was $d = 40760,95/19862,86 = 2,052$.

Comparison of the calculated value with the critical values allows us to conclude that there is no autocorrelation. Thus, the fourth assumption of the least squares method is confirmed.

In accordance with the fifth assumption of the least squares method, the residuals obey the normal distribution law, which allows us to check



Pic. 6. Graph of dependence of residuals ε_i on $Y_{i(x)}$ [compiled by the authors].



Table 5

Autocorrelation function of residuals Y_1 [compiled by the authors]

Indicator's name	Value
1 st order autocorrelation coefficient	-1,8E-05
2 nd order autocorrelation coefficient	-0,14941
3 rd order autocorrelation coefficient	0,20467
4 th order autocorrelation coefficient	0,093643
5 th order autocorrelation coefficient	-0,27394

the regression and correlation parameters based on the Student's and Fisher criteria. The constructed regression equation meets the requirements of the fifth assumption (data in Table 3).

The quality of the constructed regression equation is also assessed by the average approximation error – the average deviation of the calculated values $Y_{(xi)}$ from their actual values Y_i , determined by the formula:

$$A = \frac{1}{n} \sum \frac{|Y_i - Y_{(xi)}|}{Y_i} \tag{6}$$

For the found regression equation, the average approximation error was 8,45 %, which indicates a good fit of the equation to the initial data.

The obtained results of the evaluation of the regression parameters and correlation indicators together with the entire regression equation are recognised as statistically significant and reliable, and the constructed equation approximates the studied dependence well.

The second stage of constructing the econometric model of recursive regression equations determines the dependence of the cargo turnover of seaports on the indicators of the country's external trade turnover and world sea transportation. A linear multiple regression equation was also used as a dependence model. The obtained modelling results, a preliminary assessment of the regression parameters by Student's t -criterion and Fisher F-criterion indicated their statistical significance. Based on the calculated regression equation, the theoretical values of the resulting feature (cargo turnover indicator) were determined, the residuals of the equation were calculated, and the autocorrelation coefficients of the residuals were determined.

But with positive results of the statistical significance assessment, high values of the autocorrelation coefficients were obtained, which indicated the presence of a dependence of the series levels in the residuals, i.e. the presence of autocorrelation of the residuals of the regression equation, which is unacceptable in econometric

modelling of the relationships of dynamic series.

In this regard, the authors propose to consider the autoregressive distributed lag model (ADLM) as a dependence model, which allows considering the impact of the levels of dynamic series formed in previous periods. By means of experimental calculations based on a comparative assessment of criterion indicators, the final autoregressive equation is determined, the general form of which is as follows:

$$Y_2 = Y_{2(t-1)} + Y_{1(t-1)} + X_3 + \varepsilon, \tag{7}$$

where $Y_{2(t-1)}$ – cargo turnover of seaports during the period $t-1$;

$Y_{1(t-1)}$ – foreign trade turnover during the period $t-1$.

The results of calculations and statistical evaluation of the autoregressive equation with a distributed lag are shown in Table 6.

Therefore, the ADLM model for forecasting the cargo turnover of seaports takes the form:

$$Y_2 = -143,9483 + 0,6495Y_{2(t-1)} + 0,0673Y_{1(t-1)} + 0,0449X_3 + \varepsilon. \tag{8}$$

The adequacy of the constructed model of the dependence of the studied indicators is confirmed by checking the significance of the parameters of the regression equation and of the entire equation using the Student's t -criterion and the Fisher F-criterion.

The constructed autoregressive equation with distributed lags must also meet the five assumptions of the least squares method. To conduct the check, Table 7 shows the calculation of the residuals of this equation.

The low values of the autocorrelation coefficients given in Table 8 indicate the absence of autocorrelation in the residuals of the constructed autoregressive equation for Y_2 .

To test the first assumption of the least squares method, a graph of the dependence of the residuals ε_i on the theoretical values of Y_2 is constructed (Pic. 7).

Visual analysis of the graph allows us to conclude that the first assumption of the least squares method is met. The second assumption (zero average value of residuals) is also justified,

Table 6

Parameters and indicators for constructing the ADLM model [compiled by the authors]

Correlation analysis					
Multiple correlation coefficient (R)				0,996994	
Index of multiple determination (R ²)				0,993998	
Adjusted index of multiple determination<<Eqn045.eps>>				0,992997	
Standard error of a variable Y				16,965676	
Number of observations				22	
Analysis of variance					
	Number of degrees of freedom	Dispersion	Variance per degree of freedom	Calculated Fisher F-criterion	<i>Calculated significance level of Fisher F-criterion</i>
Factor regression	3	858067,220	286022,407	993,705	3,55112E-20
Residual regression	18	5181,015	287,834		
General regression	21	863248,240			
Regression analysis					
	Parameters of the regression equation	Standard error of a variable	<i>Calculated Student's t-criterion</i>	Calculated significance level of the Student's t-criterion	
Result variable Y ₂	-143,948359	59,396017	-2,423535	0,026131	
Factor lagged variable Y _{2(t-1)}	0,649551	0,101800	6,380610	5,218E-06	
Factor lagged variable Y _{1(t-1)}	0,067330	0,025066	2,686071	0,015091	
Factor variable X ₃	0,044959	0,013255	3,391929	0,003249	

since the sum of deviations of the theoretical values of Y_2 from its actual levels is almost zero: $\sum(Y_i - Y_{xi}) = 2,558E-12$.

Fulfilment of the third assumption of the least squares method (homoscedasticity of residuals) is also confirmed by the graph of residuals of the autoregressive equation (Pic. 7).

Based on the data in Table 6, the fifth assumption of the least squares method is verified (the residuals of the autoregressive equation obey the normal distribution law), which is confirmed

by testing according to the Student's t-criterion and Fisher F-criterion.

For the autoregressive equation, the average approximation error was also calculated, which amounted to 2,9 %, which indicates a good quality of the selected model of the studied dependence.

As a result of the study, the econometric model for forecasting the cargo base of seaports can be represented by the following system of recursive equations:

Table 7

Definition of random residuals ϵ_i for Y_2 [compiled by the authors]

Observation	Actual Y_i	Theoretical Y_{xi}	Residuals ϵ_i	Observation	Actual Y_i	Theoretical Y_{xi}	Residuals ϵ_i
1	203,7	235,5762	-31,8763	13	589	595,9448	-6,9448
2	260,8	253,5400	7,2599	14	623,4	628,3191	-4,9191
3	286	303,9349	-17,9349	15	676,7	677,2517	-0,5517
4	364	328,3520	35,6479	16	721,9	726,8583	-4,9583
5	406,9	389,2027	17,6972	17	787	766,6391	20,3608
6	421	436,9808	-15,9808	18	816,5	814,9832	1,5167
7	451	453,5747	-2,5747	19	840,3	839,3204	0,9795
8	454,6	469,5070	-14,9070	20	820,8	842,4992	-21,6992
9	496,4	473,0549	23,3450	21	835,2	830,6121	4,5878
10	525,9	514,4688	11,4311	22	841,5	845,0535	-3,5535
11	535,4	537,1996	-1,7996				
12	565,5	560,6258	4,8741	Sum			2,558E-12



Table 8

Autocorrelation function of residuals Y2 [compiled by the authors]

Indicator's name	Value
1 st order autocorrelation function	−0,1927
2 nd order autocorrelation function	−0,0028
3 rd order autocorrelation function	−0,07455
4 th order autocorrelation function	−0,0523
5 th order autocorrelation function	0,066453

$$Y_1 = -275,494 + 0,4063X_1 + 3,4659X_2 + \varepsilon, \tag{10}$$

$$Y_2 = -143,9483 + 0,6495Y_{2(t-1)} + 0,0673Y_{1(t-1)} + 0,0449X_3 + \varepsilon. \tag{11}$$

In accordance with the economic interpretation of the parameters of the regression equation, the following relationship was established between the indicators of the first equation of the system: an increase in the volume of industrial production of the country by 1 billion dollars leads to an increase in foreign trade turnover by an average of 0,4063 billion dollars per year; an annual increase in oil exports by 1 billion dollars provides an average annual absolute increase in foreign trade turnover of 3,4659 billion dollars.

The presence of an autoregressive equation with lagged variables in the system means the dependence of the resulting feature on the previous values of the factor variables of the model, expressed in the values of the regression coefficients:

- the cargo turnover of seaports will increase on average per year by 649,5 thousand tons under the influence of its own growth in the immediately preceding year by 1 million tons;
- the annual growth of the country’s foreign trade turnover by 1 billion dollars at time ($t - 1$) provides an average absolute increase in the cargo turnover of seaports in the following year in the amount of 67,3 thousand tons;
- the growth of world cargo transportation by 1 million tons per year has a positive effect on the

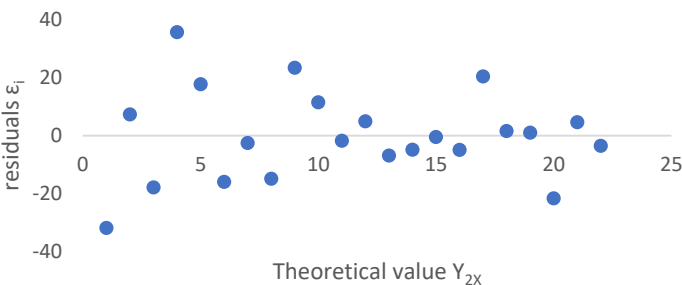
volume of cargo handling in Russian ports, increasing them by an average of 44,9 thousand tons.

CONCLUSION

The study analysed the dynamics of cargo turnover at Russian seaports, key macroeconomic indicators (volumes of foreign trade turnover and industrial production, oil exports and volumes of global cargo transportation) and identified the relationships between them for the period from 2000 to 2022. Based on the data obtained, the main factors determining the volume of cargo turnover were identified, and an econometric model for forecasting the cargo turnover of Russian seaports was developed, which is a system of recursive equations. A distinctive feature of the model is that it allows not only to present a short-term forecast of the cargo turnover of seaports, but also to assess the dependence of the port industry on the state of the national economy and its foreign economic activity.

The resulting econometric model was assessed for the closeness of the relationship between the indicators, the significance and reliability of the regression parameters and of the entire regression equations. Besides, the model was tested for compliance with the assumptions of the least squares method, which also confirmed the good quality of the constructed model.

The practical application of the presented model will allow, based on the forecast of the



Pic. 7. Graph of dependence of residuals ε_i on Y_{2x} [compiled by the authors].

cargo portfolio, to solve such problems as replenishment of the merchant fleet, rationale of the relevance of investment in the main production assets of the port infrastructure. Based on the data obtained, a unique opportunity is provided to make strategically important decisions for the industry and the country's economy regarding the transit capacity of the coastal component, the use of port capacities, as well as forecasting the employment of labour resources, which will allow timely preventive measures to be taken if such a need arises.

REFERENCES

1. Andryukovich, P. F. Notes on the principles of constructing models for forecasting economic indicators (using the example of the forecasting system «ProRosEc») [Zametki o printsipakh postroeniya modelei prognoza ekonomicheskikh pokazatelei (na primere prognoznui sistemy «ProRosEc»). *Economics and Mathematical Methods*, 2020, Vol. 56, Iss. 2, pp. 66–76. EDN: MWIIVQ.

2. Kryukov, V. A., Baranov, A. O., Pavlov, V. N., Suslov, V. I., Suslov, N. I. Problems in Developing a Comprehensive Toolkit for Macro-Economic, Inter-Regional, Inter-Sectoral Analysis and Forecasting. *Economy of regions*, 2020, Vol. 16, Iss. 4, pp. 1072–1086. DOI: 10.17059/ekon.reg.2020-4-5.

3. Samkov, T. L. Model for forecasting Russia's gross domestic product depending on financial instruments for trading energy and raw materials [Model prognoza valovogo vnutrennego produkta Rossii v zavisimosti ot finansovykh instrumentov torgovli energeticheskimi i syr'evymi tovarami]. *Problems of regional energy*, 2018, Iss. 1 (36), pp. 136–151.

4. Baburina, O. N., Kuznetsova, G. V., Podbiralina, G. V., Kheckert, E. V. World trade and international sea transportation in the context of new geoeconomic risks [Mirovaya trgovlya i mezhdunarodnie morskoe perevozki v usloviyakh novykh geoekonomicheskikh riskov]. *Social Sciences and Modernity*, 2022, Iss. 3, pp. 50–66. EDN: EWNTXM.

5. Baburina, O. N., Kondratyev, S. I., Kuznetsova, G. V. Megatrends in development of sea transport [Megatrendy razvitiya morskogo transporta]. *The Age of Globalization*, 2022, Iss. 3 (43), pp. 72–86. EDN: AUHBIO.

6. Grass, E. Yu., Lepekhina, Yu. A. A system of measures to achieve the efficiency of the production processes of the enterprise. 11th International Scientific and Practical Conference CILDIAH-2022, 2023, Vol. 164, 00008. DOI: 10.1051/shsconf/202316400008.

7. Ivin, E. A., Goryacheva, A. S., Kurbatskiy, A. N. State analysis and development prospects of cargo traffic through the seaports of Russia. *Problems of Territory's Development*, 2020, Iss. 2 (106), pp. 62–80. DOI: 10.15838/ptd.2020.2.106.5.

8. Glebkova, I. Yu., Kachanova, N. N. Factor analysis of foreign trade indicators [Faktorniy analiz pokazatelei vneshnei torgovli]. *Eurasian Union of Scientists*, 2015, Iss. 2 (11), pp. 56–59. EDN: XERELP.

9. Yu Xiao, Zhezhi Jin. The Forecast Research of Linear Regression Forecast Model in National Economy. *Open Access Library Journal*, 2021, Vol. 8, Iss. 8, e7797. DOI: 10.4236/oalib.1107797.

10. Kurenkov, P. V., Astafyev, A. V., Kolos, L. E., Chebotareva, E. A., Solop I. A., Denisenko, T. V. Development of logistics models for oil cargo transportation to reduce logistics costs and improve wagon mileage. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2022, Vol. 364, pp. 219–235. EDN: BNVPWS.

11. Krakovsky, Yu. M., Davaanyam, T. Complex forecasting of basic indicators of the transportation process [Kompleksnoe prognozirovaniye bazovykh pokazatelei perevoznogo protsessa]. *Modern technologies. System analysis. Modelling*, 2016, Iss. 3 (51), pp. 179–184. EDN: WMELEL.

12. Krakovsky, Yu. M., Luzgin, A. N. Forecasting basic indicators of the transportation process based on a scenario approach [Prognozirovaniye bazovykh pokazatelei perevoznogo protsessa na osnove stsennarnogo podkhoda]. *Applied Informatics*, 2017, Vol. 12, Iss. 2 (68), pp. 29–36. EDN: WCFIHO.

13. Kiselenko, A. N., Sundukov, E. Yu., Tarabukina, N. A. Methods to Forecast Transport Systems Development under Modern Conditions. *World of Transport and Transportation*, 2022, Vol. 20, Iss. 3 (100), pp. 40–49. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-5.

14. Macheret, D. A., Titov, R. A. Strategic Planning and Economic Assessment of Development of Intermodal Transport Infrastructure. *World of Transport and Transportation*, 2020, Vol. 18, Iss. 6, pp. 30–45. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-6-30-45.

15. Shcherbanin, Yu. A., Ivin, E. A., Kurbatsky, A. N., Glazunova, A. A. Econometric modelling and forecasting of demand for cargo transportation in Russia in 1992–2015 [Ekonometricheskoe modelirovaniye i prognozirovaniye sprosa na gruzovye pervozki v Rossii v 1992–2015]. *Scientific works. Institute of Economic Forecasting of the Russian Academy of Sciences*, 2017, Vol. 15, pp. 200–217.

16. Shirnaeva, S. Yu. Econometric modelling and forecasting of indicators of export of goods from the Russian Federation [Ekonometricheskoe modelirovaniye i prognozirovaniye pokazatelei eksporta tovarov Rossiiskoi Federatsii]. *Fundamentalnye issledovaniya*, 2020, Iss. 6, pp. 172–177. [Electronic resource]: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=42796>. Last accessed 09.10.2023.

17. Epikhin, A. I., Kondratyev, S. I., Kheckert, E. V. Predictiuo of multi-dimensional nonstationary time series using neuromodeling [Prognozirovaniye mnogomernykh nestatsionarnykh vremennykh ryadov s ispolzovaniem neiromodelirovaniya]. *Marine Intellectual Technologies*, 2020, Iss. 4–4 (50), pp. 23–27. EDN: ZPIZCJ.

18. Chien-Chang, Chou; Ching-Wu, Chu; Gin-Shuh, Liang. A modified regression model for forecasting the volumes of Taiwan's import containers. *Mathematical and Computer Modelling*, 2008, Vol. 47, Iss. 9–10, pp. 797–807. DOI: 10.1016/j.mcm.2007.05.005/.

19. Eskafi, M., Kowsari, M., Dastgheib, A. [et al]. A model for port throughput forecasting using Bayesian estimation. *Maritime Economics & Logistics*, 2021, Vol. 23, pp. 348–368. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41278-021-00190-x>. ●

Information about the authors:

Botnaryuk, Marina V., D.Sc. (Economics), Associate Professor, Professor at the Department of Economic Theory, Economics and Management of Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russia, mia-marry@mail.ru.
Ksenzova, Natalia N., Ph.D. (Economics), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Economic Theory, Economics and Management of Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russia, natksenzova@mail.ru.

Article received 20.11.2023, approved 26.02.2024, accepted 28.02.2024.





Assessment of the Impact of the Spatial Model of Terminal and Warehouse Complexes on Regional Economic Indicators



Valery A. KHAITBAEV



Evgeny V. CHERNIAEV

*Valery A. Khaitbaev*¹,*Evgeny V. Cherniaev*²¹ Volga State Transport University, Samara, Russia.² Volsk Military Institute of Material Support, Volsk, Russia.¹ ORCID: 0000-0001-8244-8842; Scopus Author ID: 57207192153; Russian Science Citation Index SPIN-code: 6990-4788; Russian Science Citation Index Author ID: 737635.² ORCID: 0009-0003-9646-5995; Russian Science Citation Index SPIN-code: 3339-3490; Russian Science Citation Index Author ID: 1197150.✉ ¹ vhaitbaev21@mail.ru.✉ ² ki-la@mail.ru

ABSTRACT

The purpose of the article is to assess the impact of the spatial model of terminal and warehouse complexes, the location of which is localised on the territories of industrial parks, on regional economic indicators.

The article examines the regional spatial model of terminal and warehouse complexes (TWCs) operating at the site of an industrial park (IP). A review of foreign and domestic literature has revealed a certain shortage of methods for assessing TWCs as initiator and

facilitators of regional economic activity. Potential sources of growth in the region's economic indicators are identified implied by the impact of the spatial factor and the advantages of locating terminal and warehouse complex facilities on IPs' sites. Approaches to the statistical interpretation of regional indicators are proposed. Their development in relation to the assessment of the potential of TWCs will make it possible in the future to include many indicators of the regions to analyse the economic impact of IPs

Keywords: terminal and warehouse system, industrial park, economic growth of the region, investment attractiveness, regional economic development

For citation: Khaitbaev, V. A., Cherniaev, E. V. Assessment of the Impact of the Spatial Model of Terminal and Warehouse Complexes on Regional Economic Indicators // World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 178–184. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-7>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

Over the past decades, a wide variety of freight transport and logistics facilities have emerged. Containerisation, nearshoring, outsourcing of transport and logistics activities, improvements in information technology and international standardisation, global supply, strengthening safety and security measures in supply chains, sustainable transport and shortening the life cycle of products are just some of the most important changes in logistics and the transport industry that significantly affect the range and quality of services offered by terminal and warehouse complexes (TWCs). During this time, the way goods are packed, stored and transported has changed, and therefore the demand for various services leads to highly differentiated logistics solutions such as industrial parks (IPs). As a result, the close links between integrated logistics services and customer satisfaction not only lead to the initial adoption of the IP concept but also serve rationale for their continuous development.

At present, a developed system of terminal and warehouse complexes (customs and excise warehouses, intermodal cargo centres, logistics centres, dry ports, domestic and intermodal terminals, distribution centres and others) has been created around the world, which has a positive effect not only on the overall quality of transportation services, but also on the economy of the respective regions.

By jointly using their infrastructure and functional resources, IPs offer both high quality and regularity of transportation services and constant warehouse capacity in real time. Since companies spend a lot of money to increase their flexibility in the face of constantly changing demand in the markets, their main goal is to gain an advantage through direct or indirect interaction with IPs.

Despite the economic challenges of a volatile business environment, many countries have already expanded their transport and logistics services to include both bimodal and trimodal inland terminals and IPs in their transport system.

Modern theories of regional development, which are classified as institutional theories, derive from previously developed theories and emphasise the need to support the creation of predominantly small and medium-sized companies (as small and medium-sized companies can respond quickly to the business

needs of the market), creating and changing the business climate in the region. On the other hand, the development of the regions is influenced by their socio-economic specialisation, the development of IPs. In world practices, IPs have gone through several stages of development, and now we can talk about several generations of industrial parks.

The first-generation IPs, built in the 1970s, differ from other generations in their rather simplified architecture. With each new generation, it became more complex, while the territory was used more comprehensively, the portfolio of services expanded, and the number of administrative staff and employees increased.

IPs undoubtedly have a positive impact on business in the region where they are located. They are advantageous because they apply modern technologies and innovations in production processes, while manufacturing of higher-class goods; besides, the region profits from foreign companies located in parks, as they bring economic and innovative capacity or internationally proven know-how to the region and thus support the process of reconstruction and modernisation of the industry and at the same time cover high trade deficit balance if any.

Another positive aspect of the industrial parks is that they create conditions for the development of small and medium-sized enterprises and their cooperation with entities engaged in foreign economic activity, which means that they have a positive effect on competitiveness, labour productivity and employment growth.

The influence of individual entrepreneurs on the overall development of the region is also important. Obviously, IPs cannot be expected to produce immediate results, however, it can be predicted that the jobs created or the transfer of technology between companies will lead to synergies. The concentration of certain types of companies can attract many investors to the region, which will lead to the need to recruit new employees.

The purpose of this study is to identify the impact of the potential of TWCs concentrated on the sites of industrial parks of a constituent entity of the Russian Federation on the economic growth of the region.

The study has applied *methods* of empirical analysis, system approach, logical, statistical and economic methods, correlation analysis, and the method of rating assessments.



BRIEF REVIEW OF LITERATURE AND RESEARCH

Many economists have studied the role of TWC as of a generator of economic growth in depth. Even though there is a wide range of different methodological studies on the impact of TWCs on improving the efficiency of a region's economic system, there is a noticeable lack of methods for assessing its role as initiators and facilitators of regional economic activity. The existing theoretical basis of such a statement seems to be completely insufficient.

S. Lyapin and his co-authors consider the theory of «poles of growth» in the regional, federal and world economy, proposing active management of the development of the region's TWCs regarding the criteria of efficiency. This approach considers not only the development of the TWC of the region, but also the socio-economic development of the adjacent entities, besides, it accounts for the regional influence of enterprises, the sustainability of which depends on the work and productivity of IPs [1].

M. Boile and co-authors analysed the impact of logistics facilities, notably of «freight villages» on the development potential of the regions [2].

The main issue considered by D. Banister and Y. Berechman is the ability of investments in the field of IPs to contribute to economic growth at the regional and local levels, to additional benefits for development. Failure to accurately identify and measure these estimated development benefits will inevitably lead to their double counting, thereby creating the risk of implementing incorrect TWC's projects [3].

According to T. Notteboom and J.-P. Rodrigue, terminals, IPs, and other logistics facilities have become an integral part of the transportation system, especially in regions heavily dependent on trade. The development of TWCs is gradually shifting to the regions due to the complexity of modern cargo distribution, increased attention to intermodal transport solutions and capacity issues. The tasks of reducing the congestion of the transport network, decreasing energy consumption and empty miles are becoming strong incentives for considering the creation and development of regional TWCs [4]. Local freight flows are the result of global and regional economic processes aimed at using core just-in-time and door-to-door strategies. The authors suggested that at the regional level, activities related to the distribution of goods can be changed through the development

and construction of new TWCs in response to the growth of consumption and demand, as well as the need to change supply chains [4].

The paper [5] notes the promising character of TWCs as of economic driving forces of the regions. In addition, another interesting element of IPs is their general independence from other clusters and industries, combined with the fact that many enterprises in various industries are economically based on, and sometimes located around logistics facilities [5; 6].

The authors [7] note that regional authorities seek to attract IPs to promote economic development, local entrepreneurship and employment levels.

The relationship between IPs and regional economic development is presented in the paper [8], which notes that the creation of IPs makes a significant contribution to the sustainable economy.

The work [9] is aimed at identifying the key macroeconomic factors affecting the creation of IPs that have a positive impact on sustainable regional development.

The study [10] notes notably the focus of IPs on the expansion of intermodal transportation.

The authors [11] studied possibilities of improving the image and competitiveness of IPs through the implementation of modern concepts of creating and developing synergies between manufacturing, industrial and logistics companies to increase the efficiency and sustainability of cargo and logistics processes. All companies in the territory of an IP can develop joint marketing services, so that small and medium-sized firms will benefit the most from such situations.

The study [12] proposes to develop clustered IPs as an effective method for the growth in competitiveness of industries and for the organisation of jobs.

RESULTS

In parallel with the main and broader role of TWCs in promoting intermodal transport, there is also their additional and no less important role as initiators of regional economic development. Regional industrial parks are platforms for this, since they create the ground for the development of the economic, intellectual and industrial potential of the region, import substitution, and increase in tax revenues to the budgets of all levels. IP's infrastructure is logistics one, as it includes class A and B warehouses, corporate distribution centres, marketplaces.

Table 1

Employment in the transportation and warehousing

Federal constituent entities	Share			
	2020	2021	2022	2023
Russian Federation	7,4 %	7,6 %	7,77 %	7,82 %
Volga Federal Distirct	6,46 %	6,46 %	6,83 %	7,07 %
Republic of Bashkortostan	5,49 %	5,53 %	5,84 %	6,19 %
Republic of Mari El	4,46 %	4,67 %	4,91 %	4,92 %
Republic of Mordovia	5,21 %	5,19 %	5,36 %	5,77 %
Republic of Tatarstan	7,22 %	7,17 %	7,45 %	8,12 %
Udmurt Republic	5,93 %	5,95 %	6,34 %	6,16 %
Chuvash Republic	3,72 %	3,86 %	4,31 %	4,47 %
Perm Krai	7,46 %	7,39 %	7,89 %	7,56 %
Kirov region	5,26 %	5,59 %	6,18 %	6,59 %
Nizhny Novgorod Region	5,94 %	5,97 %	6,74 %	6,93 %
Orenburg Region	6,60 %	6,56 %	7,52 %	7,64 %
Penza Region	5,80 %	5,80 %	6,63 %	6,66 %
Samara Region	8,38 %	8,32 %	8,44 %	8,98 %
Saratov Region	7,56 %	7,53 %	7,14 %	7,03 %
Ulyanovsk Region	5,83 %	5,83 %	5,93 %	6,28 %

Source: Federal State Statistics Service <https://rosstat.gov.ru/>

IPs act as the driving force of the economy of their regions, which potentially affect the regional unemployment rate, gross regional product (GRP) and job creation, investment attractiveness and trade volumes (regional imports/exports). The unemployment rate and GRP can be described as the most characteristic economic indicators of the regions. Investment attractiveness illustrates the overall attractiveness of domestic and foreign investment for each region.

Industrial parks provide an excellent institutional framework, additional services and high-performance infrastructure. They contribute to attracting and implementing the necessary investments, increasing employment, competitiveness, sustainable implementation of business and regional economic development strategies. They also create an environment for the introduction of new technology, training and

innovation, creation of jobs and markets, and, as a result, for the consolidation of existing industries [13–16].

Industrial parks, located in 72 regions of Russia, provide convenient access to large urban agglomerations and product markets. Enterprises operating in industrial parks are important actors in the local economy (especially firms that employ a larger number of people), and this situation is likely to continue in the next 4–5 years.

By creating jobs and increasing investment in production, industrial parks develop the economy of not only the region, but also the country.

After a thorough review of the statistical data, it is possible to confirm an overall increase in the concentration of employment in the transportation and warehousing sector, both for the Russian Federation and for the subjects of the Volga



Table 2

GRP dynamics in 2020–2023, billion rubles

	2020	2021	2021/2020	2022	2022/2021	2023	2023/2022
Russian Federation	94410,2	121183,0	128,36 %	140670,8	116,08 %	171041	121,59 %
Volga Federal District	13655,4	15963,18	116,90 %	19664,6	123,19 %	20188	102,66 %
Kirov region	396,9	452,7	114,06 %	554,6	122,51 %	575,1	103,70 %
Nizhny Novgorod Region	1600,30	1730,6	108,14 %	2287,9	132,20 %	2390	104,46 %
Orenburg Region	1046,70	1239	118,37 %	1571,4	126,83 %	1500	95,46 %
Penza Region	484,8	586	120,87 %	592,9	101,18 %	593	100,02 %
Perm Krai	1385,40	1400	101,05 %	2002,8	143,06 %	1800	89,87 %
Republic of Bashkortostan	1694,20	2059,4	121,56 %	2242,6	108,90 %	2544	113,44 %
Republic of Mari El	198	214	108,08 %	262	122,43 %	247,7	94,54 %
Republic of Mordovia	266,4	299,8	112,54 %	342,6	114,28 %	361,5	105,52 %
Republic of Tatarstan	2631,30	3400	129,21 %	4179,3	122,92 %	4153,7	99,39 %
Samara Region	1625,50	1969,6	121,17 %	2378,5	120,76 %	2800	117,72 %
Saratov Region	856,5	984,8	114,98 %	1194	121,24 %	1300	108,88 %
Udmurt Republic	684,4	790,68	115,53 %	965,7	122,14 %	956	99,00 %
Ulyanovsk Region	439	484,6	110,39 %	588,8	121,50 %	571	96,98 %
Chuvash Republic	346	352	101,73 %	501,5	142,47 %	396	78,96 %

Source: Federal State Statistics Service <https://rosstat.gov.ru>.

Federal District (see Table 1). The exceptions are the Udmurt Republic and the Perm Territory, where in 2023 compared to 2022 there was a decrease in the share of those employed in this sector.

GRP is still the main indicator of the level of regional socio-economic development. The dynamics of the total GRP of Russia and the Volga Federal District is presented in Table 2 and shows its growth in 2020–2023. The total volume of GRP of the Russian Federation in nominal terms increased by 76,630.8 billion rubles during the analysed period. In total terms, for all constituent entities of the Russian Federation for the analysed period GRP increased by 1,8 times. In the constituent entities of the Russian Federation in the Volga Federal District – by 1,5 times.

The stability of economic development is ensured by the positive dynamics of GRP in the transportation and warehousing sector that witnessed a growth in the Russian Federation by 1,7 times and in the Volga Federal District by 1,6 times in 2017–2023.

Another important factor contributing to the region's economic growth is investment capital,

which is analysed on the example of the Russian Federation and the Volga Federal District (Table 3). The growth dynamics indicates that the Russian Federation and the Volga Federal District are following the path of economic growth thanks to increasing their capital, which has recently been actively channelled and invested in the transportation and warehousing sector.

High investment activity in the Volga Federal District is due not only to the localisation of large enterprises of the manufacturing and mining industries in this district, but also to the active development of small and medium-sized businesses, which generate significant demand for the locations within industrial parks.

Thus, the past four years have demonstrated positive rates of all regional economic activity that are directly or indirectly related to the transportation and warehousing sector. The development and expansion of IPs and their various modifications (technology parks, business incubators, free economic zones, etc.) create an infrastructure for industrial production, especially in the Volga Federal District, where a third of the country's operating IPs is concentrated.

Table 3

Dynamics of investments in fixed assets and the transportation and warehousing sector (TW)

	Investments, billion rubles									
	2021		2022		2023		Absolute change 2023/2021		Relative change 2023/2021	
	total	TW	total	TW	total	TW	total	TW	total	TW
Russian Federation	17 690	3226,4	21 829	4219,8	34 036	4963,7	16 346	1737,3	192,40 %	153,85 %
Volga Federal District	2073,3	314,2	2 565,2	601,4	4830,2	778,92	2 757	464,72	232,97 %	247,90 %
Kirov region	52,1	6,9	59,2	8,6	106,24	10,4	54	3,5	203,92 %	150,72 %
Nizhny Novgorod Region	265,6	33,7	462,1	164,5	686,93	226,7	421	193	258,63 %	672,70 %
Orenburg Region	149,3	15,3	179,5	24,9	293,4	32,5	144	17,2	196,52 %	212,42 %
Penza Region	53,8	9,1	60,3	12,7	121,81	13,6	68	4,5	226,41 %	149,45 %
Perm Krai	242,2	21,8	290,2	33,02	370,3	49,5	128	27,7	152,89 %	227,06 %
Republic of Bashkortostan	247,9	45,6	305,6	53,25	620	58,575	372	12,975	250,10 %	128,45 %
Republic of Mari El	22,2	2,9	25,5	3,3	52,23	3,63	30	0,73	235,27 %	125,17 %
Republic of Mordovia	41,1	6,6	48,6	12,7	74,1	13,97	33	7,37	180,29 %	211,67 %
Republic of Tatarstan	451,2	59,4	597,5	143,9	1180,4	158,29	729	98,89	261,61 %	266,48 %
Samara Region	264,8	66,6	306,6	97,8	516,6	107,58	252	40,98	195,09 %	161,53 %
Saratov Region	123,1	27,5	149,9	42,5	286,54	46,75	163	19,25	232,77 %	170,00 %
Udmurt Republic	70,3	5,9	85,96	8,3	166,3	9,13	96	3,23	236,56 %	154,75 %
Ulyanovsk Region	50,2	7,6	56,7	7,7	120,8	8,47	71	0,87	240,64 %	111,45 %
Chuvash Republic	39,5	5,2	71,6	36,2	123,4	39,82	84	34,62	312,41 %	765,77 %

Source: Federal State Statistics Service <https://rosstat.gov.ru>.

To study the degree of relationship between variables, correlation analysis is most often used in economic research, which is a tool that allows you to show the proximity of one variable to another. Linear correlation analysis is most often used in such studies [17–19].

For the Volga Federal District, to assess the impact of the development of IPs on its economic growth (GRP, volume of investment, number of employees), a correlation coefficient was calculated (a detailed calculation is not

described in this article), which indicates a close relationship between the number of IPs and the main socio-economic indicators of the region.

In the Volga Federal District, the leading regions in terms of the number of industrial parts are the Republic of Bashkortostan. the Republic of Tatarstan, the Ulyanovsk region (ten or more industrial parks per each region). This distribution is due to the level of socio-economic activity, developed transport and logistics infrastructure,



the presence of large industrial facilities, and the demand of manufacturers.

CONCLUSIONS

The review analysis shows that IPs play a significant role in ensuring the dynamic growth of regional economies, creating competitive conditions for new industries, attracting domestic and foreign investment in the regions, reducing unemployment by creating new jobs, using the labour potential of the nearest settlements.

The study allows us to positively estimate the contribution of IPs to the achievement of the goals of sustainable development of the regions, through the creation of the necessary infrastructure, growth in employment and industrial production, as well as through replenishing regional and local budgets.

REFERENCES

1. Lyapin, S., Rizaeva, Y., Kadasev, D., Sysoev, A. Methods to Analyze Traffic Demand formation in Intelligent Transportation and Logistic Regional Network. *Transportation Research Procedia*, 2020, Vol. 45, pp. 522–529. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.061>.
2. Boile, M., Theofanis, S., Ozbay, K. Feasibility of freight villages in the NYMTC region. Rutgers University. Center for Advanced Infrastructure and Transportation, 2011. [Electronic resource]: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/23252>. Last accessed 10.09.2024.
3. Banister, D., Berechman, Y. Transport investments and promotion of economic growth. *Journal of Transport Geography*, 2001, Vol. 9, Iss. 3, pp. 209–218. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00013-8).
4. Notteboom, T., Rodrigue, J.-P. Inland Terminals within North American and European Supply Chains. *Transport and Communication Bulletin for the Asia-Pacific Region.*, 2009, No. 78, pp. 1–39. [Electronic resource]: <https://core.ac.uk/download/pdf/327177365.pdf#page=12>. Last accessed 10.09.2024.
5. Sheffi, Y. Logistics-Intensive Clusters: Global Competitiveness and Regional Growth. In: Bookbinder, J. (eds). *Handbook of Global Logistics*. International Series in Operations Research & Management Science, Vol. 181. Springer, New York, NY. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6132-7_19 [access for subscribers].
6. Rivera, L., Sheffi, Y., Knoppen, D. Logistics clusters: The impact of further agglomeration, training and firm size on collaboration and value-added services. *International Journal of Production Economics*, 2016, Vol. 179, pp. 285–294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.018>.
7. Gafurov, I., Panasyuk, M., Pudovik, E. Interregional Logistic Center as the Growth Point of Regional Economics. *Procedia Economics and Finance*, 2014, Vol. 15, pp. 474–480. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(14\)00486-9](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(14)00486-9).
8. Hein, A. M., Jankovic, M., Farel, R., Yannou, B. A Conceptual Framework for Eco-Industrial Parks. In: *Proceedings of the ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. Vol. 4: 20th Design for Manufacturing and the Life Cycle Conference; 9th International Conference on Micro- and Nanosystems. Boston, Massachusetts, USA. August 2–5, 2015. V004T05A024. ASME. DOI: <https://doi.org/10.1115/DETC2015-463229> [access for subscribers].
9. Kiselakova, D., Kiselak, A. Analysis of Macroeconomic Factors for the Establishment of Industrial Parks and Their Effects on Regional Development: Empirical Study from Slovakia. *Asian Economic and Financial Review*, 2014, Vol. 4 (9), pp. 1220–1236. [Electronic resource]: <https://archive.aessweb.com/index.php/5002/article/view/1251/1784>. Last accessed 10.09.2024.
10. Saleman, Y., Jordan, L. The Implementation of Industrial Parks: Some Lessons Learned in India. *Journal of International Commerce, Economics and Policy*, 2015, Vol. 06, No. 01, 1550005. DOI: <https://doi.org/10.1142/S1793993315500052>.
11. Falahatdoost, S., Wang, X. Industrial Park Role as a Catalyst for Regional Development: Zooming on Middle East Countries. *Land*, 2022, Vol. 11 (8), 1357. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11081357>.
12. Monga, C. Cluster-Based Industrial Parks: A Practical Framework for Action. December 1, 2011. World Bank Policy Research Working Paper No. 5900. [Electronic resource]: <https://ssrn.com/abstract=1969272>. Last accessed 10.09.2024.
13. Zheng, Siqi; Sun, Weizeng; Wu, Jianfeng; Kahn, M. E. The birth of edge cities in China: Measuring the effects of industrial parks policy. *Journal of Urban Economics*, 2017, Vol. 100, pp. 80–103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jue.2017.05.002>.
14. Kozma, G., Molnár, E. The role of industrial parks in the economic development of Debrecen. *TerGazdasag Amber*, 2018, 6 (4), pp. 35–49. [Electronic resource]: <http://real.mtak.hu/id/eprint/100048>. Last accessed 10.09.2024.
15. Lee, Y.-H., Kao, L.-L., Liu, W.-H., Pai, J.-T. A Study on the Economic Resilience of Industrial Parks. *Sustainability*, 2023, 15 (3), 2462. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15032462>.
16. Borodavkina, N., Mukovnina, E. The role of industrial parks in ensuring sustainable development of the region. *E3S Web Conf.*, 291 (2021) 01004. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202129101004>.
17. Tian, X., Zhang, M. Research on Spatial Correlations and Influencing Factors of Logistics Industry Development Level. *Sustainability*, 2019, 11 (5), 1356. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11051356>.
18. Lan, S., Yang, C., Huang, G. K. Data analysis for metropolitan economic and logistics development. *Advanced engineering informatics*, 2017, Vol. 32, pp. 66–76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2017.01.003>.
19. Altman, M. A more scientific approach to applied economics: Reconstructing statistical, analytical significance, and correlation analysis. *Economic Analysis and Policy*, 2020, Vol. 66, pp. 315–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eap.2020.05.006>.
20. Islomov, S., Mamayeva, L. Using of expert assessment method in the management of vehicle enterprises. *AIP Conf. Proc.* 11 March 2024; 3045 (1): 030092. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0197329>. ●

Information about the authors:

Khaitbaev, Valery A., D.Sc. (Economics), Professor at the Department of Transport Economics and Logistics of Volga State Transport University, Samara, Russia, vkhaitbaev21@mail.ru.

Cherniaev, Evgeny V., Ph.D. (Economics), D.Sc. candidate at Volsk Military Institute of Material Support, Volsk, Russia, ki-la@mail.ru.

Article received 05.05.2024, approved 12.09.2024, accepted 16.09.2024.



Analysis of Methodological Approaches to the Selection of Regular Municipal Routes to be Served by Electric Buses



Maxim A. KUDRYASHOV



Maxim V. SKORKIN

Maxim A. Kudryashov¹, Maxim V. Skorkin²

^{1, 2} Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia.

¹ Russian Science Citation Index SPIN-code: 6666-0154; Russian Science Citation Index Author ID: 890537.

✉ ¹ sparky5@yandex.ru.

ABSTRACT

The article is devoted to the analysis of trends of operation and the selection of parameters for solving the problem of optimal allocation of electric buses to serve a given set of routes.

The number of registrations and sales is estimated as one of the methods for assessing the trends in operation of electric buses. The average values of the battery capacity are determined depending on the category and purpose of operation of an electric bus. The analysis of governmental programs for electrification of passenger transportation of some countries has resulted in compiling a set of statistical values, followed by the study of domestic experience in operating electric buses on regular municipal routes.

The results of the analysis, considering the identified trends, have allowed setting the objective of selecting priority parameters for determining the routes to be served with electric buses.

Regular municipal routes served by the Mosgortrans, largest European operator of electric buses, have been selected as the object of the study.

The main research method has been based on PRISMA, a proved methodology of meta-analysis of previously completed studies. The analysis of 22 methodological approaches to organising the operation of electric buses has resulted in identifying four priority technical and operational parameters influencing the selection of the route (L_m , V_e , N_{stop} , Q). The study has allowed to suggest a general algorithm for solving the problem of selecting optimal regular municipal routes for operation of electric buses and to identify directions for further research.

Keywords: passenger transport, electric bus, regular municipal routes, technical and operational indices of a route.

For citation: Kudryashov, M. A., Skorkin, M. V. Analysis of Methodological Approaches to the Selection of Regular Municipal Routes to be Served by Electric Buses. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 185–192. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-8>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

The operation of electric buses on regular municipal routes has recently become an intensively implemented trend. Thus, relevant is solving the problem of optimal placement of electric buses to serve a given set of routes. The *objective* of the study described in the article is to analyse operating trends and the selection of parameters for solving the above problem.

RESULTS

Analysis of Global Trends in Operation of Electric Buses on Regular Municipal Routes

One of the methods for assessing trends in the operation of electric buses is to estimate the number of registrations and sales. Registrations show the number of vehicles that were first registered with government agencies or insurance companies.

Pic. 1 shows the results of the analysis of the number of registrations and the percentage of sales of electric buses in the world in 2016–2022. It should be noted that in China, vehicle insurance is issued for the vehicle, not for a specific driver.

As the report of the International Energy Agency (IEA) shows, «in 2022, nearly 66 000 electric buses... were sold worldwide, representing about 4.5 % of all bus sales... worldwide. China continues to dominate production and sales of electric... buses. In 2022, 54 000 new electric buses... were sold in China, representing 18 %... of total sales in China and about 80 %... of global sales...». It's worth noting that «...many of the buses... being sold in Latin America, North America and Europe are Chinese brands»¹.

«Within Europe, the sales share for electric buses was highest in Finland, where electric buses made up two-thirds of sales in 2022, Norway and the Netherlands, where they made up nearly half of sales, and Denmark, where they made up nearly one-third. Sales shares were also high in Sweden, Switzerland and Israel»¹.

It is important to note that the production and sales of electric buses have fluctuated over few years due to the subsidies provided (the total amount of subsidies from 2018 to 2021 was less than 2,9 billion USD), but since 2021, sales of electric buses have begun to grow again¹.

Of the electric bus models available for sale in 2022, 60 % (more than 500 models) were

produced by Chinese manufacturers. Another 20 % (more than 170 models) were produced by American manufacturers and 15 % (more than 120 models) by European manufacturers¹.

A table compiled based on data¹ and the Global Drive to Zero ZETI database² shows model range of zero-emission buses and their average battery capacity (Table 1).

Automotive lithium-ion (Li-ion) battery demand increased by about 65 % to 550 GWh in 2022, from about 330 GWh in 2021, primarily as a result of growth in electric passenger car sales, with new registrations increasing by 55 % in 2022 relative to 2021¹.

In 2022, according to the findings of IEA global-ev-outlook-2023 report, venture capital investments «in start-ups producing vehicles and charging technologies increased by 50 % to USD1,2 billion. The increase was particularly high in the charging segment, which saw an all-time high among early-stage funding at USD730 million. There was also a notable increase in funding for battery recycling and reuse, which stood at USD200 million, an eightfold increase relative to 2021»¹. The similar trend was revealed by Cleantech Group i3³.

Based on the database of the International Energy Agency (IEA)⁴ the authors selected 294 policies (including programs, strategic plans, grants, permitting regimes, etc.) referring to electrification of the urban passenger land transport, among which most had been approved in Spain, Portugal, the USA, China, Italy, and Canada (Pic. 2).

Of 294 policies, 223 (76 %) were in force, 66 (23 %) had ended or achieved, and the remaining were announced (at the approval or development stage) at that time (Pic. 3).

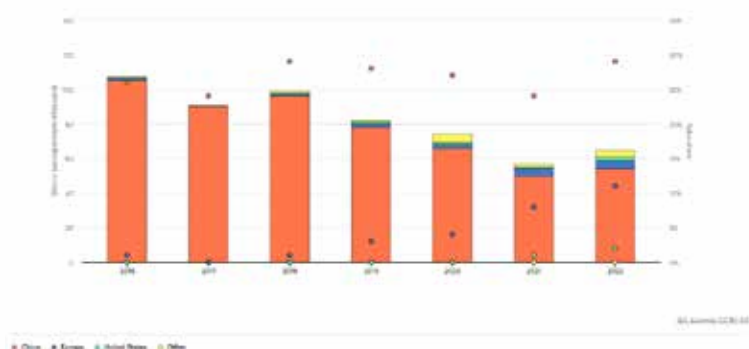
An analysis of the jurisdiction of the policies (Pic. 4) showed that they were predominantly within national jurisdiction (239 policies or 81,3 % of total), followed by policies within city/municipal jurisdiction (30 or 10,2 %), within state/provincial jurisdiction (22 or 7,5 %) and international jurisdiction (3 or 1 %).

² ZETI (Zero-Emission Technology Inventory). [Electronic resource]: <https://globaldrivetozero.org/tools/zeti/>. Last accessed 04.12.2023.

³ Cleantech Group i3 database [Electronic resource]: <https://www.cleantechforeurope.com/publications/cleantech-q3-briefing-2022#chapter-03>. Last accessed 04.05.2023.

⁴ IEA policies database [Electronic resource]: <https://www.iea.org/policies?sector%5B0%5D=Passenger%20transport%20%28Road%29>. Last accessed 04.05.2023.

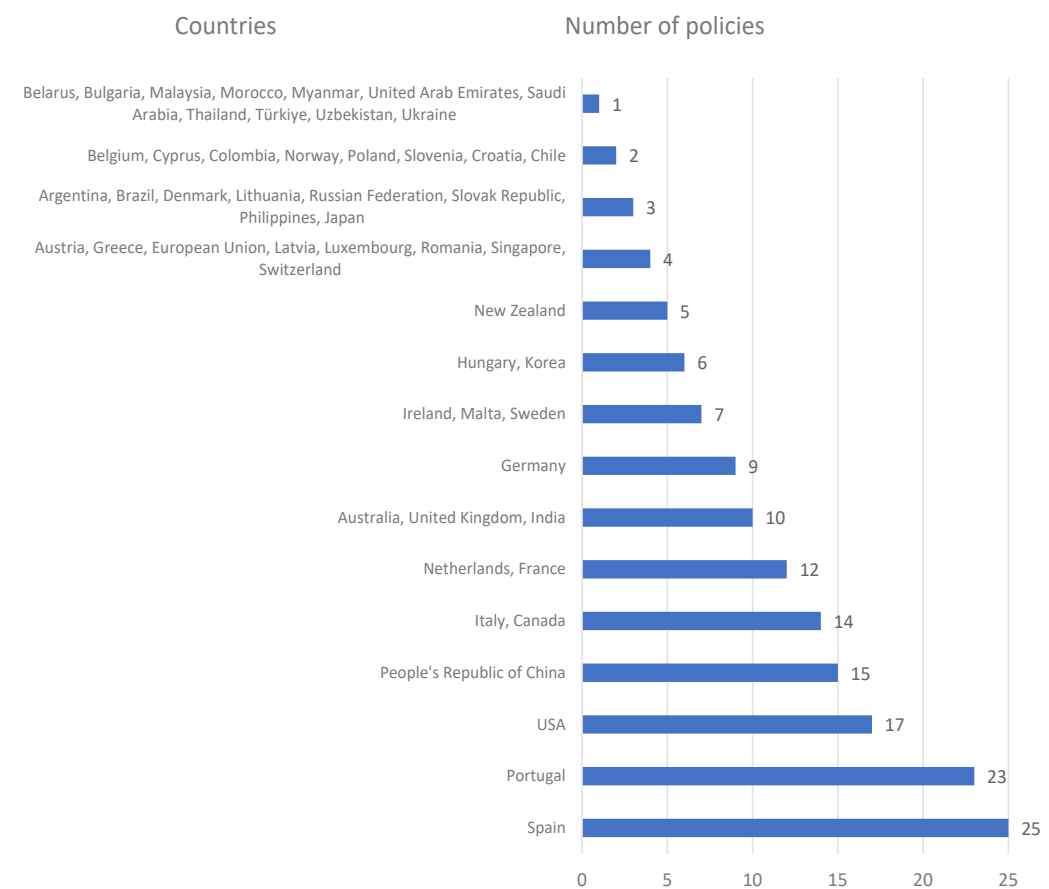
¹ Global EV Outlook 2023. The International Energy Agency [Electronic resource]: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. Last accessed 04.12.2023.



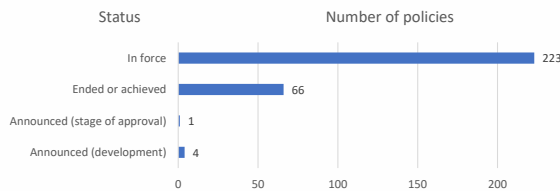
Pic. 1. Electric bus registrations and sales share by region, 2015–2022 [IEA (2023), Electric bus registrations and sales share by region, 2015–2022, IEA, Paris <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-bus-registrations-and-sales-share-by-region-2015-2022>, Licence: CC BY 4.0].

Table 1
Average capacity of electric bus batteries [¹, Global Drive to Zero ZETI database]

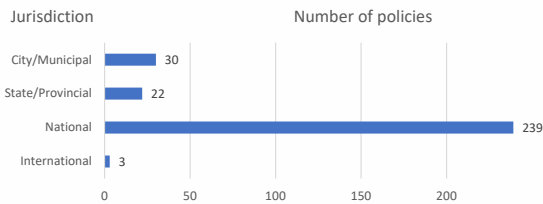
Vehicle category and purpose	Average battery capacity (kWh)				Change in average indicator 2019–2022
	2019	2020	2021	2022	
M3III, transit bus	264	322	225	345	31 %
M3I, M3II, shuttle bus	104	119	120	150	45 %
M3I, M3II, school bus	155	141	207	137	–12 %



Pic. 2. Number of policies in the field of electrification of urban passenger land transport in different countries [based on the data ¹].



Pic. 3. Distribution of policies by status [based on the data *].



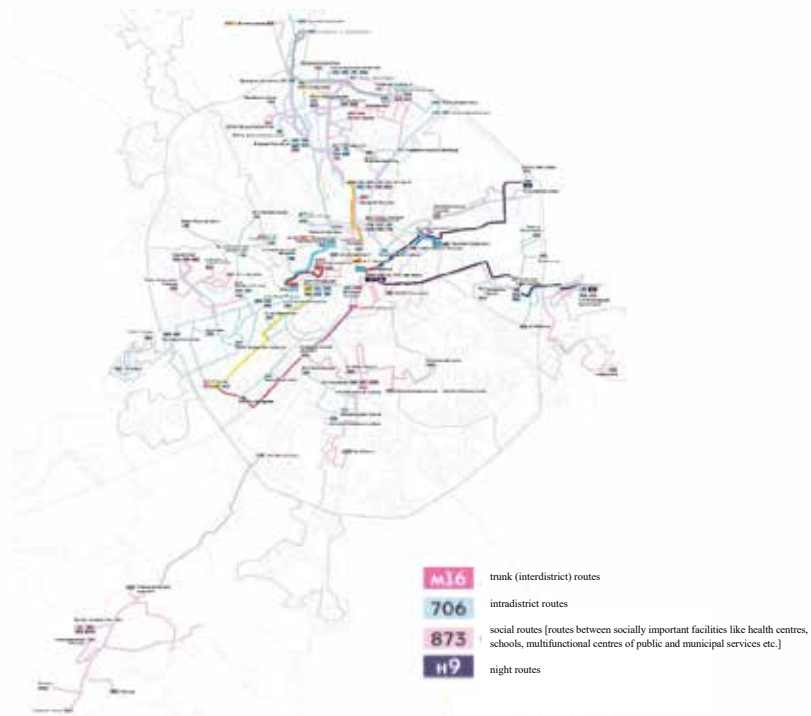
Pic. 4. Distribution of policies by jurisdiction [based on the data *].

Table 2
Model range of electric buses by manufacturers [compiled by the authors]

№	Manufacturer	Number of models
1	PJSC KAMAZ	2
2	PJSC GAZ	1
3	LLC Volgabus	1
4	JSC Sinara-Transport Machines	1
5	LLC PK Transport Systems	3
6	JSC Sstroytrans	1

Table 3
Operation of electric buses on regular municipal routes [compiled by the authors]

City	Number of electric buses	Number of routes
Moscow	1055	79
St.Petersburg	10	1
Lipetsk	5	1
Vladivostok	2	1
Rybinsk	2	1
Sochi	2	1
Tyumen	1	1



Pic. 5. Electric bus route map (Electric buses' route map.
[Electronic resource]: <https://www.mosgortrans.ru/electrobus/map/>. Last accessed 07.05.2023.).

A significant number of analysed policies contains a forecast for the range and capacity of electric buses for the period up to 2030 under various scenarios as well as forecast values for the number of charging stations.

Russian Experience of Electric Buses’ Operation

As of 2023, the main manufacturers of electric buses in the Russian Federation were KAMAZ PJSC, GAZ PJSC, Volgabus LLC, Sinara-Transport Machines JSC, PC Transport Systems LLC, Stroytrans JSC. The model range presented on the official websites of the manufacturers is summarised in Table 2.

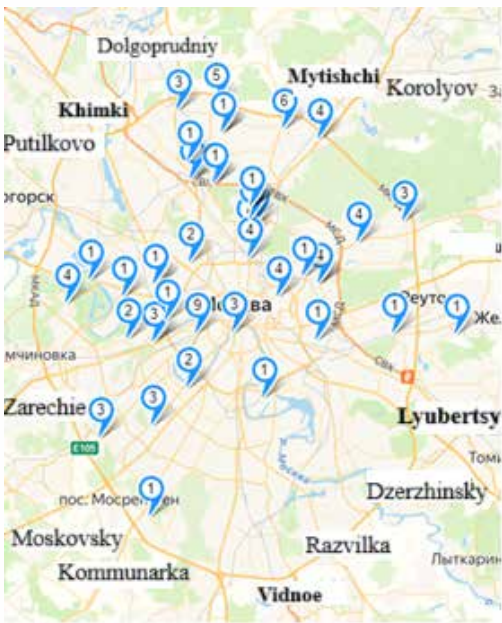
As of January 2023, electric buses served regular municipal routes in seven cities (Table 3).

Thus, the largest operator of urban passenger land transport system operating electric buses on regular municipal routes is Mosgortrans [literally Moscow Transport], state unitary enterprise. As of March 2023, Mosgortrans operated 1055 electric buses on 79 routes. The mapping of the routes served by electric buses is shown in Pic. 5.

The analysis of information on the charging infrastructure of electric buses (the number and location of charging stations) was carried out based on the results of concluded contracts published on the public procurement website. Based on the analysis, it was revealed that at the end of 2022, there were 208 charging stations in Moscow, some of which are shown in Pic. 6. The location of 82 charging stations was missing in the TORs (terms of reference) that read in those cases as «the exact delivery address is provided to the Supplier by official notification from Mosgortrans within 5 (five) working days from the date of signing the contract».

Analysis of Methodological Approaches to Assigning Electric Buses to a Route

To identify the factors influencing a conversion of a route to the use of electric buses or the creation of a new route for the electric buses, an analysis of possible methodological approaches to the operation of electric buses on municipal routes was conducted based on the previously tested PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) methodology [1]. The general algorithm of the methodology is shown in Pic. 7.



Pic. 6. Location of some charging stations of the Mosgortrans [the picture compiled by the authors].

The list of search queries was formed using software products for compiling a semantic core and analysing keywords in previously completed studies.

An additional analysis of keywords in previously completed studies was performed during the subsequent assessment of frequency and clustering considering their semantics.

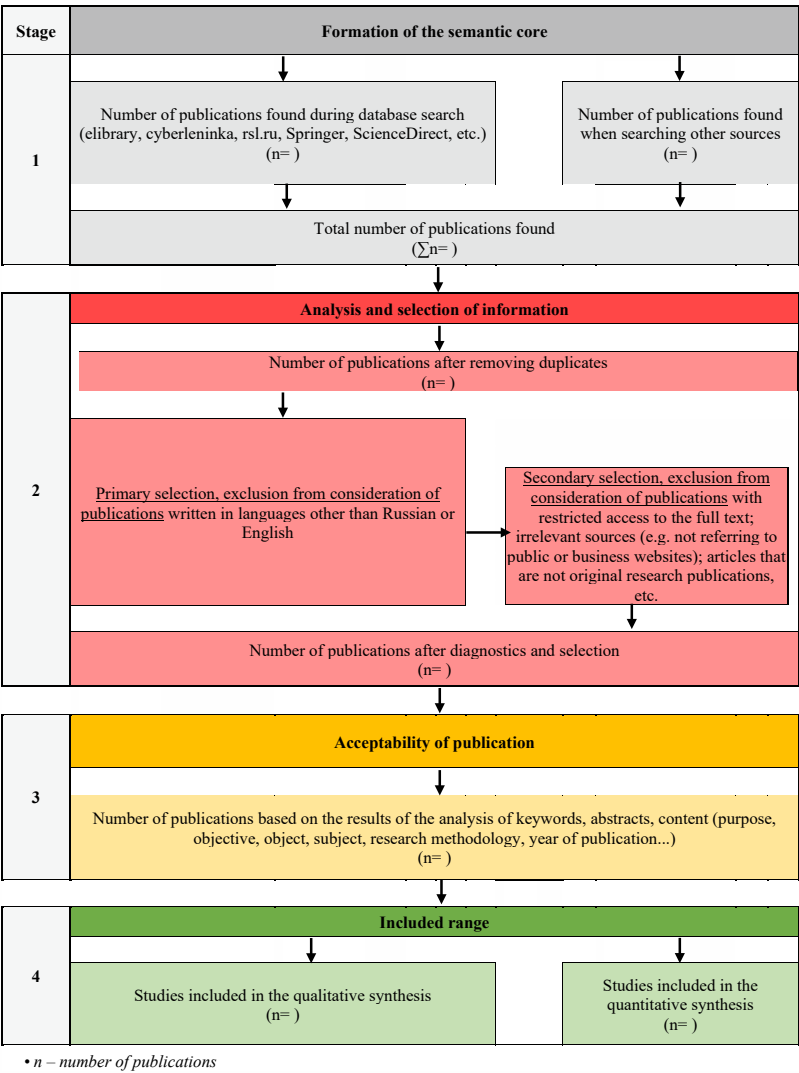
The analysis shows that this area has become especially relevant in recent years, and it should also be noted that most of the works was performed by the authors of different countries.

The analysis showed that the main indicators when choosing a route to be served by electric buses are passenger flow, speed, number of stopping points and route length. The time it takes for a bus to make a full round trip on the route is excluded from further analysis, since this parameter is directly dependent on the considered route length, speed, and number of stopping points. Table 4 presents the summary results of the qualitative analysis of the selected studies.

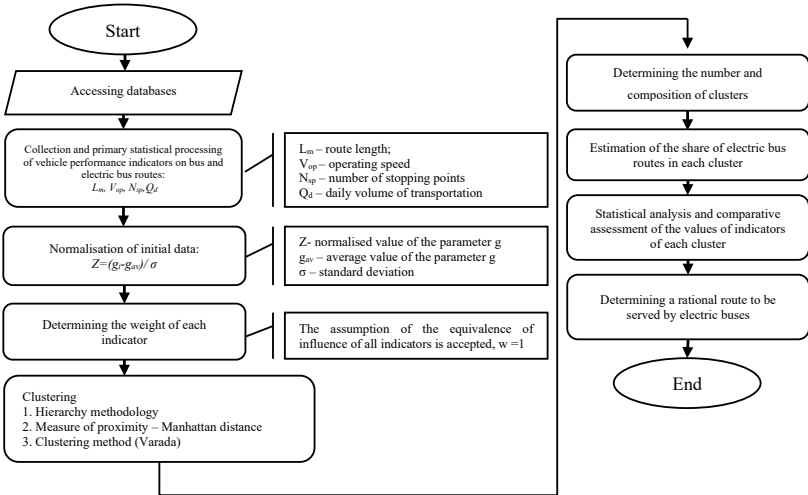
Rationale of Selection of a Bus Route Intended to Be Further Served by Electric Buses

When developing projects for the operation of electric buses on regular municipal routes, it is necessary to determine the qualitative and quantitative requirements for the charging infrastructure and the fleet and perform an economic assessment of the proposed





Pic. 7. Adapted PRISMA methodology scheme [developed by the authors].



Pic. 8. Algorithm for solving the problem of selecting optimal regular municipal routes to be served by electric buses [performed by the authors].

Table 4

Consideration of the indicators influencing the choice of a route [compiled by the authors]

№	Technical and economic indicators												Source
	Route							Passenger flow					
	V _{op}	I	L _r	t _{fit}	F _e	N _{sp}	l _j	Q _{max}	Q _h	Q _d	P _i	Q _{seg}	
1	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	[2]
2	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	[3]
3	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	[4]
4	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	[5]
5	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	-	[6]
6	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	-	-	[7]
7	+	-	+	+	+	+	-	-	-	+	-	-	*
8	+	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-	-	[8]
9	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	[9]
10	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	[10]
11	-	-	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	[11]
12	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	[12]
13	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	[13]
14	+	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	[14]
15	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	[15]
16	-	-	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	**
18	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+	-	-	[16]
19	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	***
20	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	[17]
21	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	[18]
22	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	[19]
Σ	13	4	21	17	8	14	13	6	8	11	3	4	

Notes: V_{op} – operating or service speed of vehicles on a route; I – time interval between two electric buses arriving at a stopping point, frequency of service; L_r – length of a route; t_{fit} – time it takes for an electric bus to make a full round trip in the route; F_e – electric bus service frequency; N_{sp} – number of stopping points; l_j – length of a j^{th} segment of a route; Q_{max} – maximum passenger flow; Q_h – hourly passenger flow; Q_d – daily passenger flow; P_i – total number of passengers embarking and disembarking at an i^{th} stopping point; Q_{seg} – passenger flow within route segments.

* Report of the International Association of Public Transport Union (UITP). Performance evaluation framework: For electric buses in India. [Electronic resource]: <https://www.uitp.org/publications/performance-evaluation-framework-for-electric-buses-in-india/>. Last accessed 05.05.2023.

** The Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Training Needs Assessment for Electric Buses in India: Volume I–Identification of Training Needs. [Electronic resource]: <https://transformative-mobility.org/multimedia/training-needs-assessment-for-electric-buses-in-india-volume-i-identification-of-training-needs/>. Last accessed 05.05.2023.

*** E-Bus. Solution booklet. Smart Cities Marketplace 2023 European Union. [Electronic resource]: <https://www.eiturbanmobility.eu/wp-content/uploads/2023/02/230113-Solution-Booklet-E-bus-Updated.pdf>. Last accessed 07.05.2023.

solutions under the specific operating conditions.

The general algorithm for solving the problem of selecting optimal regular municipal routes to be converted for the operation of electric buses, considering the selected parameters, is shown in Pic. 8.

CONCLUSION

Further research should focus on statistical and cluster analysis of bus, electric bus routes, and the complete set of routes of Mosgortrans using the selected parameters with an assessment of the share of electric bus routes in the clusters. Additional assessment of the conformity of bus and electric bus routes could be proposed through comparing the average values of the standardised

indicators of the entire set of the resulting clusters of electric bus and bus routes. Based on the analysis results, a hypothesis can be put forward about the greatest conformity of a cluster of bus routes with electric bus routes. To test the proposed methodology and solve the technological problems of organising the operation of the fleet, considering the homogeneity of the route parameters in the cluster, a route is selected, and the main technological problems of organising the operation of an electric bus on the selected route are solved:

- determination of the nominal passenger capacity in accordance with the requirements of the social standard of public transport services as amended by the order of the Ministry of Transport of Russia dated 13.04.2018 No NA-55-r;



– planning the operation of the fleet of electric buses and drivers on the route, including traffic scheduling, and planning of energy consumption.

In conclusion, it is necessary to calculate the main technical, operational and economic indicators, draw up a daily statement of technical and economic performance, and estimate current costs under the standard taxation system.

REFERENCES

1. Kudryashov, M. A., Bludyan, N. O. Methods for Assessing Temperature Regimes in the Passenger Compartment of Public Urban Transport Vehicles. *Transport: science, equipment, management. Scientific information collection*, 2022, Iss. 2, pp. 43–54. DOI: 10.36535/0236-1914-2022-02-7.
2. Gorbunova, A. D. Analysis of the factors influencing the choice of the urban regular route for the electric bus. *Bulletin of civil engineers*, 2021, Iss. 4 (87), pp. 127–133. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-4-127-133.
3. Gorbunova, A. D. Influence of the route norm of electricity consumption by an electric bus on the choice of a regular urban route for its operation [*Vliyaniye marshrutnoi normy raskhoda elektroenergii elektrobosom na vybor gorodskogo regul'yarnogo marshruta dlya ego ekspluatatsii*]. Prospective development of science, engineering and technology: collection of scientific articles of the 11th International scientific and practical conference, Kursk, October 29, 2021. Kursk: South-West State University, 2021, pp. 82–84. EDN: UFUNGO.
4. Gorbunova, A. D., Smirnova, O. Yu. Development of the algorithm for selecting a rational regular urban route for electric bus operation. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*, 2021, Vol. 18, Iss. 4 (80), pp. 378–389. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-4-378-389.
5. Jain, M., Jain, H., Tiwari, G., Rao, K. R. Indicators to Measure Performance Efficiency of Bus Systems. Final Report. Prepared for Shakti Sustainable Energy Foundation, New Delhi. TRIPP-PR-16–02. Transportation Research and Injury Prevention Programme, Indian Institute of Technology, Delhi, 2016, 56 p. [Electronic resource]: <https://shaktifoundation.in/wp-content/uploads/2016/07/Indicators-to-measure-performance-efficiency-of-bus-systems1.pdf>. Last accessed 28.02.2024.
6. Hjelkrem, O. A., Lervåg, K. Y., Babri, S., Lu Chaoru., Södersten, C. J. A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, Vol. 94, 102804. DOI: 10.1016/j.trd.2021.102804.
7. Kudryashov, M. A., Prokopenkov, A. V., Ayriev, R. S. Methodical Approach to Organisation of Transportation on Electric Bus Routes. *World of Transport and Transportation*, 2020, Vol. 18, Iss. 5 (90), pp. 152–170. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-152-170.
8. Reboças, A. B., Daniel, J., Delgado, O. Operational analysis of battery electric buses in São Paulo. Technical study developed for São Paulo Transportes S/A (SPTrans) as part of the ZEBRA initiative (Zero Emission Bus Rapiddeployment Accelerator) [Electronic resource]: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/02/Operational-analysis-of-battery-electric-buses-in-Sao-Paulo-final2-feb2023.pdf>. Last accessed 05.12.2023.
9. Eudy, L., Prohaska, R., Kelly, K. J., Post, M. B. Foothill Transit Battery Electric Bus Demonstration Results. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2016, Report number: NREL/TP-5400–65274. DOI: 10.13140/RG.2.1.1236.0087.
10. Su, X., Jiang, L., Huang, Y. Design of Electric Bus Transit Routes with Charging Stations under Demand Uncertainty. *Energies*, 2023, Vol. 16, Iss. 4, 1848. DOI: 10.3390/en16041848.
11. Thorne, R. J., Hovim, I. B., Figenbaum, E., Pinchasik, D. R., Amundsen, A. H., Hagman, R. Facilitating adoption of electric buses through policy: Learnings from a trial in Norway. *Energy Policy*, 2021, Vol. 155, 112310. DOI: 10.1016/j.enpol.2021.112310.
12. Göhlich, D., Künith, A., Ly, Tu-Anh. Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin. *WIT Transactions on the Built Environment*, 2014, Vol. 138, pp. 137–149. DOI: 10.2495/UT140121.
13. Wang, Y., Liao, F., Lu, C. Integrated optimization of charger deployment and fleet scheduling for battery electric buses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2022, Vol. 109 (12), 103382. DOI: 10.1016/j.trd.2022.103382.
14. Xylia, M., Leduc, S., Patrizio, P., Kraxner, F., Silveira, S. Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2017, Vol. 78, pp. 183–200. DOI: 10.1016/j.trc.2017.03.005.
15. Gong, J., He, J., Cheng, C., King, M., Yan, X., He, Z., Zhang, H. Road Test-Based Electric Bus Selection: A Case Study of the Nanjing Bus Company. *Energies*, 2020, Vol. 13, Iss. 5, pp. 1253. DOI: 10.3390/en13051253.
16. Kudryashov, M. A., Prokopenkov, A. V., Ayriev, R. S. On the Issue of Regulatory Support for Passenger Electric Vehicles Operation. *World of Transport and Transportation*, 2020, Vol. 18, Iss. 1 (86), pp. 196–211. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-196-211.
17. Kapskiy, D. V., Kuzmenko, V. N., Krasilnikava, A. S., Semchenkov, S. S., Kot, E. N., Larin, O. N. Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk. *Science & Technique*, 2022, Vol. 21, Iss. 2, pp. 150–157. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157.
18. Lotfi, M., Pereira, P., Paterakis, N., Gabbar, H. A., Catalão, J. P. S. Optimizing Charging Infrastructures of Electric Bus Routes to Minimize Total Ownership Cost. 2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Madrid, Spain, 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope49358.2020.9160687.
19. Kairmukhambetov, O. B. Performance characteristics of electric buses. *The Bulletin of KazATC named after M. Tynyshepayev*, 2021, Vol. 116, Iss. 1, pp. 136–144. DOI: 10.52167/1609-1817-2021-116-1-136-144. ●

Information about the authors:

Kudryashov, Maxim A., Senior Lecturer at the Reference Department of Urban Passenger Transport operated in cooperation with the Mosgortrans, State Unitary Enterprise, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, sparky5@yandex.ru.

Skorkin, Maxim V., Bachelor at the Department of Road Transport Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, xzelution@yandex.ru.

Article received 08.12.2023, approved 03.09.2024, accepted 10.09.2024.



Methodological Foundations for Classification of Suburban Passenger Companies in Russia



Victor A. PODSORIN



Vladimir V. BUROVTSSEV



Andrey N. KOBYLITSKY



Anastasia A. KURANOVA

Victor A. Podsorin¹, Vladimir V. Burovtsev², Andrey N. Kobylitsky³, Anastasia A. Kuranova⁴

¹Russian University of Transport, Moscow, Russia.

^{2, 3, 4} Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia.

¹ ORCID 0000-0002-2552-8536; Web of Science Researcher ID: IRZ-6836–2023; Scopus Author ID: 57203539855; Russian Science Citation Index SPIN-code: 1168–4110; Russian Science Citation Index Author ID: 410922.

² Russian Science Citation Index SPIN-code: 6449–9512; Russian Science Citation Index Author ID: 787476.

³ ORCID 0000-0003-2109-0124; Web of Science Researcher ID: ABB-1203–2020; Scopus Author ID: 57215859242; Russian Science Citation Index SPIN-code: 9573–4237; Russian Science Citation Index Author ID: 614895.

✉ ¹podsorin@mail.ru.

ABSTRACT

To solve the economic tasks of the suburban passenger railway transport, it is necessary to form new and improve the existing methodological foundations of its functioning. At the modern stage of development of passenger transportation in the Russian Federation, as a rule, it is classified per mode of transport and types of transportation. Railway passenger transportation is split per type of transportation services in broad terms into long-distance and suburban transportation services.

The structural reform of railway transport, which had been carried out from 2003 to 2015, resulted in formation of a market of suburban passenger railway transportation. This market is represented by 25 suburban passenger companies, subsidiaries and dependent companies of JSC Russian Railways, by several independent carriers and structural divisions of JSC Russian Railways, performing transportation under special conditions. Suburban passenger railway carriers are subjects of natural monopolies and in most cases are created with participation of regional authorities, and their activities are socially significant for ensuring transport mobility of the population in the regions of the Russian Federation. Thus, the suburban passenger

transportation market is a complex system with a special order of interaction of its main actors.

In modern academic literature and in the textbooks, there is a certain gap in classification of structural elements of the passenger transport market. The authors propose to use the ABC–XYZ analysis toolkit to form the so-called «core» of suburban passenger companies and to study regional disproportions in the passenger transport system.

The article proposes a methodological basis for classifying suburban passenger companies depending on the subsidies amount received as per performed passenger turnover. A classification of suburban passenger companies (SPC) was developed based on the study of the ratio of subsidies provided to the suburban passenger entities due to state regulation of tariffs and the performed passenger turnover. The ABC–XYZ analysis of the SPC performance indicators for a considered period allowed to develop their classification and to draw recommendations for assessing the risks of unprofitability and possible ways to reduce them. The identified structure of the suburban passenger transport market can serve as a basis for smoothing out disproportions in the level of public transport services.

Keywords: passenger turnover, transport market, suburban passenger companies, subsidies, financial results, quartile analysis, ABC–XYZ analysis, unprofitability, risk.

For citation: Podsorin, V. A., Burovtsev, V. V., Kobylitsky, A. N., Kuranova, A. A. Methodological Foundations for Classification of Suburban Passenger Companies in Russia. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 193–199. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-9>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

The human need for movement is satisfied in the passenger transport market, where transport users and transport organisations providing various transport services interact. The transport market in the field of passenger transportation (the passenger transportation market) has its own distinctive features, like conditions for performing transportation and the need for state regulation, both in Russia and abroad^{1,2} [1–4].

Passengers should be considered as transport users, and carrier companies should be considered as market participants. The regulators of the transport market in the field of passenger transportation are federal and regional executive authorities, whose area of responsibility includes formation of tariffs for the services of natural monopolies and antitrust regulation [5; 6].

METHODOLOGY, OBJECTIVES AND PURPOSES OF THE STUDY

The suburban railway transportation market is a complex socio-economic system that was formed as a result of the structural reform of the Russian Federation railway transport in the period from 2001 to 2015. Moreover, the extension of the reform period by five years (to 2010–2015) was largely due to incompleteness of the market transformation of the passenger segment of railway transport both in long-distance and suburban traffic [7–9]. During this period, a system of regulatory and legal acts was formed that regulated the rules and procedure for interaction between market participants in terms of leasing infrastructure, rolling stock and the procedure for compensating income fallen out because of state regulation of tariffs. The federal government provided the necessary financial support to both the infrastructure owner and the subsidised regions; suburban passenger companies (SPCs) were created. However, the existing suburban passenger transportation market cannot be considered homogeneous either in terms of the volumes of transportation performed or in terms of operational, socio-economic and other conditions. In the works of

the authors [10; 11], significant unevenness of the allocated subsidies to the suburban passenger companies was revealed both in absolute terms and in relative terms, for example, in terms of the amount of subsidies relative to the completed passenger turnover.

The *objective* of the study is to develop methodological approaches to classifying suburban passenger entities to improve the economic mechanism for its sustainable development.

The research *methodology* is based on the works of domestic and foreign authors in the field of economics of the railway passenger system, as well as on publications of the results of scientific research on its development. The main scientific methods and techniques include methods of the system analysis, mathematical statistics, economic analysis, etc.

The methodological basis for classifying suburban passenger companies in Russia is based on:

- systems analysis, that is, the entire range of methodological tools that are used to develop and substantiate solutions to problems of complex systems;
- the methodology of quartile and ABC–XYZ analysis;
- the methodology of indicative planning and forecasting of performance indicators of transport organisations.

RESULTS

The basic scheme of subsidising the passenger railway companies as a result of state regulation of tariffs is as follows. According to the Methodology for Calculating Economically Justified Costs, suburban passenger companies estimate expected costs by elements and components: for cars, infrastructure and station components of costs in the form of calculating the index of change in operation volumes in vehicle-kilometres, and for locomotive – in train-kilometres. The results of the assessment are submitted to the executive authorities of the region in charge of state regulation of tariffs; based on them, a public order for transportation is then formed [12; 13].

Since due to the state regulation of the tariff it is set below the economically justified level, while fulfilling the public order, lost income is generated, which is subsequently compensated from regional budgets in the form of public assistance to natural monopoly entities.

¹ Concept for development of suburban passenger transportation by rail. Approved by the order of the Government of the Russian Federation dated 19.05.2014 No 857-r. [Electronic resource]: <https://docs.cntd.ru/document/499097146?marker=656010>. Last accessed 18.10.2023.

² Economics of passenger transport: Textbook for bachelor students. Ed. by Persianov, V. A. 2nd ed., reprinted. Moscow, Knorus publ., 2014, 390 p.

The long-distance passenger transportation market also operates a subsidising mechanism to compensate for state regulation of the tariff, for example, for such operators as JSC Federal Passenger Company (JSC FPC) and the Directorate of High-Speed Transportation (DOSS) – a branch of JSC Russian Railways, operating express, speed and high-speed trains^{3,4,5}. Regulation of long-distance passenger transportation is carried out according to a different scheme, namely through establishment of a tariff for travel in open-plan sleeping cars and in sitting cars in accordance with the tariff calculated based on the order of the Federal Tariff Service of Russian Federation dated 27.07.2010 No. 156-t/1, adjusted by the integrated index for the relevant period, as well as indexes differentiated by calendar periods of the year [13].

Subsidies are the main source of covering the losses of SPCs, which is confirmed by the fact that structurally, for more than half of the companies, compensations constitute a significant part of revenues^{6,7} [2]. The economic justification for the required subsidies' amount is the quarterly reporting on the composition of costs of SPCs^{1,7} [10; 11].

To assess the effectiveness of providing subsidies by regional authorities to SPCs, the authors grouped the amounts of compensations per passenger-kilometre using the calculation of quartiles in a ranked series (see Table 1) having chosen the ratio of the amount of subsidies provided to suburban passenger companies to their passenger turnover as the main analysed indicator based on publicly disclosed corporate reporting. The approximated data set for the period 2021–22 was used exclusively to model the SPCs' classification

methodology, and not to compare the performance indicators of individual companies, which was beyond the authors' purposes, and see the relatively short time series. For that reason, further modelling is proposed in the article without mentioning individual companies.

For an in-depth classification of SPCs, the authors conducted a statistical analysis of the efficiency of the subsidies received using the ABC–XYZ method.

ABC-analysis^{8,9} [14–15] involves ranking a set of SPCs depending on the ratio of the subsidy to the carrier's passenger turnover. The companies are divided into three groups: Group A – SPC with high budget expenditures per passenger-kilometre; Group B – moderate result of using the subsidy; Group C – the most efficient use of the allocated compensation. The method of distributing SPCs into groups assumes that the following conditions are met: A – SPCs are within first 50 % of the sums of shares as a cumulative total; B – from 50 to 80 % and C – more than 80 % of the cumulative indicator. The results of grouping SPCs using ABC analysis are presented in Table 2.

The next stage of classification is to conduct XYZ-analysis, which ranks the SPCs by the dynamics of indicators, characterising their stability and predictability of change.

The assessment is made based on the calculation of a coefficient of variation for each company for the estimated period of activity. The coefficient of variation is the ratio of the standard deviation to the arithmetic mean, reflecting the degree of scatter of values around the average value.

Thus, the dispersion (σ^2) and the standard deviation σ are calculated using formulas (1) and (2)^{9, 11,12}:

³ On determining the economically justified level of tariffs for transportation of passengers by public rail transport on long-distance routes in open-plan sleeping cars and sitting cars for 2023 and its forecast level for 2024. Order of the Federal Antimonopoly Service of the Russian Federation dated May 5, 2023, No. 270/23. Reference and legal system «Consultant Plus». [Electronic resource]: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_448640/. Last accessed 27.10.2023.

⁴ Annual report of the joint-stock company «Federal Passenger Company» for 2022. Centre for corporate information disclosure of JSC «IA Interfax». [Electronic resource]: <https://www.e-disclosure.ru/portal/FileLoad.ashx?FileId=1799918>. Last accessed 19.10.2023.

⁵ Official website of JSC RZD. [Electronic resource]: <https://company.rzd.ru/ru/9349>. Last accessed 13.10.2023.

⁶ Annual report of the joint-stock company «Central Suburban Passenger Company» for 2022. Website <https://disclosure.skrin.ru/disclosure/7705705370/?DTI=7>. [Electronic resource]: <https://clck.ru/3PxkTD>. Last accessed 15.10.2023.

⁷ Centre for Disclosure of Corporate Information of JSC «IA Interfax». [Electronic resource]: <https://www.e-disclosure.ru>. Last accessed 12.10.2023.

⁸ Kochneva, D. I. Methods and models of logistics: Study-method. Guide. Yekaterinburg, UrGUPS publ., 2018, 166 p. [Electronic resource]: <https://e.lanbook.com/book/121410>. Last accessed 20.10.2023.

⁹ Falin, G. I., Falin, A. I. Selected chapters of descriptive statistics: Study guide. Moscow, MAX Press, 2011, 131 p.

¹⁰ Passenger turnover of public railway transport // Federal State Statistics Service of the Russian Federation (Rosstat): official website. [Electronic resource]: <https://rosstat.gov.ru/statistics/transport>. Last accessed 15.10.2023.

¹¹ Dougherty, Christopher. Introduction to econometrics. Christopher Dougherty. New York; Oxford: Oxford univ. press, 1992, XII, 399 p. [Edition in Russian: Infra-M, MSU, 1999, XIV, 402 p.].

¹² General Theory of Statistics: Textbook. Ed. by Eliseeva, I. I., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, 4th ed., rev. and enl. Moscow: Finance and Statistics publ., 2001, 480 p.



Table 1

Classification of SPCs by the amount of subsidies per passenger turnover for the period 2021–2022 [11]

Name	Rub./pass.-km for 2021	Name	Rub./pass.-km for 2022
First group – 26,09 %: «Green zone»			
North-West SPC	0,10	North-West SPC	0,15
Kuban Express-Suburb	0,45	Sverdlovskaya PC	0,32
Express-Suburb	0,732	Kuban Express-Suburb	0,38
Sverdlovskaya PC	0,733	Central SPC	0,78
Central SPC	0,89	Express-Suburb	0,92
Altai-suburb	1,09	Altai-suburb	1,26
Second group – 47,82 %: «Central» (Yellow) zone»			
Omsk-suburb	1,10	Samara SPC	1,43
Volgo-Vyatskaya SPC	1,26	Omsk-suburb	1,53
Samara SPC	1,29	Volgo-Vyatskaya SPC	1,54
Commonwealth SPC	1,81	North Caucasian SPC	1,58
Perm PC	2,07	Commonwealth SPC	1,82
North Caucasian SPC	2,25	Perm PC	2,447
Krasprigorod	2,42	Krasprigorod	2,453
Primorye Express	2,48	Primorye Express	2,52
Kuzbass-Suburb	2,49	Kaliningrad SPC	2,77
Kaliningrad SPC	2,68	Volgogradtransprigorod	3,07
Volgogradtransprigorod	3,37	Baikal SPC	3,11
Third group – 26,09 %: «Red zone»			
Baikal SPC	3,47	Kuzbass-Suburb	3,22
SPC Chernozemye	4,20	Bashkortostan SPC	4,82
Bashkortostan SPC	4,95	SPC Chernozemye	5,22
Northern SPC	5,55	Northern SPC	5,91
Transbaikali SPC	11,84	Transbaikali SPC	13,92
PC Sakhalin (suburban traffic)	20,55	PC Sakhalin (suburban traffic)	14,09

Source: compiled by the authors based on the data ^{6, 7, 10}, previous publications [11].

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \tag{1}$$

where \bar{x} is average value of subsidy per passenger turnover for the period under review, rub./passenger-kilometre (pass.-km);

x_i – the value of the subsidy per passenger turnover for the i -th year, rub./pass.-km; n is the number of years for which the analysis is conducted,

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}. \tag{2}$$

Therefore, the coefficient of variation (v) can be determined by the following formulas ^{9, 11, 12}:

$$v = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}}{\bar{x}} \cdot 100\% \text{ or } v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100\%. \tag{3}$$

Based on the obtained coefficient of variation, a suburban passenger company is assigned one of three groups: X – if a coefficient of variation is from 0 % to 10 %, which indicates stability and accuracy of forecasting the indicator in

question; Y – from 10 % to 25 %, reflecting moderate homogeneity of the population and the probability of deviation of the forecast from the actual situation by no more than 25 %; Z – indicating high variability of the indicator of SPC in question ^{9, 11, 12}. The results of the grouping are shown in Table 3.

Based on the results of the integration of ABC-analysis and XYZ-analysis, a summarising Table 4 was compiled.

DISCUSSION

The ABC–XYZ analysis showed that structurally the largest share belongs to CX group – 30.43 % (see Table 4). Most of SPCs belonging to CX group are distinguished by fairly high budgetary subsidies. In relation to the volume of transportation operations, these companies consistently show high efficiency of budgetary investments – the average level of subsidy per passenger turnover in the group is

Table 2

ABC analysis of the subsidy structure of SPCs in 2021–2022

PPCs	Subsidies per passenger turnover, rub./pass. -km		Average value, rub./pass.-km	Specific weight, %	Accumulated value, %	Group
	2021 r.	2022 r.				
A	20,55	14,09	17,32	22,64	22,64	A
B	11,84	13,92	12,88	16,83	39,47	A
C	5,55	5,91	5,73	7,49	46,96	A
D	4,95	4,82	4,88	6,38	53,34	B
E	4,20	5,22	4,71	6,15	59,50	B
F	3,47	3,11	3,29	4,30	63,80	B
G	3,37	3,07	3,22	4,21	68,01	B
H	2,49	3,22	2,86	3,73	71,74	B
I	2,68	2,77	2,72	3,56	75,30	B
J	2,48	2,52	2,50	3,26	78,56	B
K	2,42	2,45	2,44	3,18	81,75	C
L	2,07	2,45	2,26	2,95	84,70	C
M	2,25	1,58	1,92	2,51	87,20	C
N	1,81	1,82	1,81	2,37	89,57	C
O	1,26	1,54	1,40	1,83	91,40	C
P	1,29	1,43	1,36	1,78	93,18	C
Q	1,10	1,53	1,31	1,72	94,90	C
R	1,09	1,26	1,18	1,54	96,44	C
S	0,89	0,78	0,84	1,09	97,53	C
T	0,73	0,92	0,82	1,08	98,60	C
U	0,73	0,32	0,53	0,69	99,29	C
V	0,45	0,38	0,42	0,54	99,83	C
W	0,10	0,15	0,13	0,17	100,00	C
Total:	–	–	76,51	100,00	–	–

Source: compiled by the authors based on data ^{6, 7, 10}.

1,47 rub./pass.-km, considering the low variation.

The carriers of CY group are distinguished by a lower degree of stability, however, just like the representatives of CX group, they show that the results of their operations justify the volumes of financial support.

On the contrary, suburban carriers of BX and BY groups are less efficient in terms of the use of compensations and, in comparison with the quartile classification, are completely included in the «central» group. SPCs included in BX have a stable result, however, considering their average efficiency, it is advisable for these carriers to switch to a group with a more dynamic performance indicator.

AX and AY groups require the greatest attention, since the companies referred to them have the highest costs per unit of passenger turnover. Moreover, as ABC–XYZ analysis showed, SPC B and SPC C steadily occupy the positions indicated in the quartile classification (third group).

SPC U (AZ group) showed the highest efficiency of the funds used in 2022. The highest

variation indicator is 39,24 % (see Table 4), with its positive trend, indicates the appropriateness of the compensation received and its compliance with the passenger turnover indicators. Forecasting the further activities of SPC U, two main prospects can be noted: strengthening the position, and, consequently, the future transition to CY group or further growth in efficiency while remaining in CZ group.

Comparing the results of the application of subsidies relative to tariff regulation for suburban and long-distance carriers, it is to note that only SPCs included in the lower quartile or groups CY and CZ ABC–XYZ–analysis, namely SPC W and SPC U, correspond to the level of subsidy per passenger turnover applied in 2022 to the regulated segment of JSC Federal Passenger Company (0,26 rub. / pass.-km) ⁴.

Based on the analysis of the results of SPCs activities in 2021–2022, we can conclude that suburban passenger carriers are strongly dependent on fulfilment of the budget obligations to compensate for losses due to state regulation of tariffs [5; 16–17].



Table 3

XYZ-analysis of the structure of SPCs' subsidising in 2021–2022

PPCs	Average value, rub./pass.-km	Dispersion	Mean square deviation	Coefficient of variation, %	Group
A	17,32	10,4287	3,2293	18,65	Y
B	12,88	1,0758	1,0372	8,05	X
C	5,73	0,0325	0,1803	3,15	X
D	4,88	0,0046	0,0676	1,39	X
E	4,71	0,2571	0,5071	10,77	Y
F	3,29	0,0318	0,1782	5,41	X
G	3,22	0,0218	0,1475	4,58	X
H	2,86	0,1329	0,3646	12,76	Y
I	2,72	0,0022	0,0473	1,74	X
J	2,50	0,0003	0,0186	0,74	X
K	2,44	0,0003	0,0179	0,74	X
L	2,26	0,0357	0,1890	8,37	X
M	1,92	0,1111	0,3333	17,39	Y
N	1,81	0,0000	0,0069	0,38	X
O	1,40	0,0197	0,1405	10,02	Y
P	1,36	0,0046	0,0678	4,99	X
Q	1,31	0,0449	0,2118	16,12	Y
R	1,18	0,0071	0,0843	7,16	X
S	0,84	0,0031	0,0558	6,68	X
T	0,82	0,0085	0,0920	11,17	Y
U	0,53	0,0426	0,2065	39,24	Z
V	0,42	0,0014	0,0375	9,04	X
W	0,13	0,0008	0,0276	21,86	Y
Total:	3,33	–	–	–	–

Source: compiled by the authors.

Table 4

Classification of SPCs by the subsidies' amount per passenger turnover based on ABC–XYZ analysis for the period 2021–2022

Group name	PPCs	Specific weight, %	Average subsidy amount for the group, rub./pass.-km
AX	B, C	8,70	9,30
BX	D, F, G, I, J	21,74	3,32
CX	K, L, N, P, R, S, V	30,43	1,47
AY	A	4,35	17,32
BY	E, H	8,70	3,78
CY	M, O, Q, T, W	21,74	1,12
AZ	–	–	–
BZ	–	–	–
CZ	U	4,35	0,53
Total:	–	100,00	–

Source: compiled by the authors based on data ^{6, 7, 10} and Tables 1–3.

CONCLUSION

The results of classification of suburban passenger companies showed, as far as the considered period was concerned, a certain disproportion in the provision of subsidies to the suburban companies, which entail risks of a decrease in the quality of transport services to population and in the efficiency of the regional transport systems.

Quartile and ABC–XYZ-analysis of the operations of the suburban passenger companies for a given period, can if implemented regularly and consistently serve as a basis for making management decisions on the further reforming and developing this sector of transportation in the interests of passengers and the national economy. The classification of SPCs proposed by the authors

and based on ABC–XYZ-analysis informs stakeholders and regulators of the passenger transportation market about the efficiency rate in using the received compensation and the expedience of allocating determined amounts of state support to suburban railway transport. Therewith, the assessment intended for decision-making should be comprehensive and consider the totality of other factors of social, economic and other nature.

REFERENCES:

1. Schneider, M. A., Proskuryakova, E. A. Market of suburban railway transportation. Management and economics: Monograph [Rynok prigorodnykh zheleznodorozhnykh perevozok. Upravlenie i ekonomika: Monografiya]. St. Petersburg, Publishing house «Tipografiya «NP-Print» LLC, 2012, 288 p. ISBN 978-5-905942-17-4.

2. Kobylitsky, A. N. Formation of the transport services market of the Far Eastern Federal District in the sphere of suburban railway transportation. Abstract of Ph.D. thesis (Economics) [Formirovaniye rynka transportnykh uslug Dalnevostochnogo federalnogo okruga v sfere prigorodnykh zheleznodorozhnykh perevozok. Avtoref. kand. ekon. nauk]. Khabarovsk, FESTU publ., 2012, 24 p.

3. Zhou, Y., He, S., Wang, X. [et al]. Optimization of Heterogeneous Passenger Subway Transfer Timetable Considering Social Equity. *Urban Rail Transit*, 2023, Vol. 9, pp. 246–265. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40864-023-00198-x>.

4. Taylor, B. D., Morris, E. A. Public transportation objectives and rider demographics: are transit's priorities poor public policy? *Transportation*, 2015, Vol. 42 (2), pp. 347–367. DOI: [10.1007/s11116-014-9547-0](https://doi.org/10.1007/s11116-014-9547-0).

5. Sokolov, Yu. I., Kolyadin, D. G., Schukin, V. V., Podoplelova, Ya. V. Improving methods of public regulation of suburban passenger transport market. *Transportnoe delo Rossii*, 2023, Iss. 1, pp. 283–285. DOI: [10.52375/20728689_2023_1_283](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_1_283).

6. Shkurina, L. V., Voblova, T. V., Beryakov, S. N. Theoretical and methodological foundations of financing the transport infrastructure of regions [Teoretiko-metodologicheskie osnovy finansirovaniya transportnoi infrastruktury regionov]. *Economy and Entrepreneurship*, 2019, Iss. 2 (103), pp. 381–383. EDN: ZBXUST.

7. Tereshina, N. P., Tretyak, V. P., Chuverina, O. G. Economic effects of the functioning of quasi-integrated structures in the creation of a single digital platform of a suburban complex in Russia. *Transportnoe delo Rossii*, 2023, Iss. 6, pp. 154–157. EDN: UVJAZX. DOI: [10.52375/20728689_2023_6_154](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_6_154).

8. Lapidus, B. M., Macheret, D. A. Methodology for assessing and ensuring the effectiveness of innovative transport systems [Metodologiya otsenki i obespecheniya effektivnosti innovatsionnykh transportnykh sistem]. *Ekonomika zheleznnykh dorog*, 2016, Iss. 7, pp. 16–25. EDN: WHNILD.

9. Persianov, V. A., Orlyuk, A. A., Sakulyeva, T. N. State regulation of transport: through the prism of public good [Gosudarstvennoe regulirovaniye na transporte: skvoz prizmu obshchestvennogo blaga]. *Transport: science, technology, management. Scientific information collection*, 2015, Iss. 3, pp. 15–19. EDN: TJGSTX.

10. Podsorin, V. A., Burovtsev, V. V., Kobylitsky, A. N., Kuranova, A. A. Results of operation of a suburban passenger complex in Russia: economic, technological and regional aspects. *Transportnoe delo Rossii*, 2023, Iss. 6, pp. 84–87. EDN: UOCDKN. DOI: [10.52375/20728689_2023_6_84](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_6_84).

11. Podsorin, V. A., Burovtsev, V. V., Kobylitsky, A. N., Kuranova, A. A. Assessment of the distribution of subsidies in the suburban passenger complex of Russia based on a feasibility study of the results of its activities. *Transportnoe delo Rossii*, 2023, Iss. 6, pp. 202–205. EDN: IZWVJM. DOI: [10.52375/20728689_2023_6_202](https://doi.org/10.52375/20728689_2023_6_202).

12. Rachek, S. V., Zubkova, A. F., Fedchenok, A. D. Improving the organizational and economic mechanism of railway passenger transportation [Sovershenstvovanie organizatsionno-ekonomicheskogo mekhanizma zheleznodorozhnykh passazhirskikh perevozok]. *Bulletin of Ural State University of Economics*, 2012, Iss. 2 (40), pp. 25–30. EDN: PEJAGF.

13. Miroshnichenko, O. F., Oginskaya, A. E. Improving the pricing system for infrastructure services for passenger carriers [Sovershenstvovanie sistemy tarifitatsii uslug infrastruktury dlya pasazhirskikh perevozchikov]. *Ekonomika zheleznnykh dorog*, 2015, Iss. 7, pp. 43–53. EDN: UAECJJ.

14. Savruk, A. N., Savruk, N. T. Assessing the state and level of development of transportation infrastructure in the subjects of the Russian Federation. *Finansy i kredit*, 2021, Vol. 27, Iss. 6 (810), pp. 1204–1219. EDN: FVXVAL. DOI: [10.24891/fc.27.6.1204](https://doi.org/10.24891/fc.27.6.1204).

15. Filimonova, Z. V., Safronov, S. A., Polikarpov, A. A. [et al.] Correlation analysis of the main performance indicators of suburban passenger companies during periods of unstable demand [Korrelatsionnyy analiz osnovnykh pokazatelei deyatel'nosti passazhirskikh prigorodnykh kompanii v period nestabil'nogo spros'a]. *Ekonomika zheleznnykh dorog*, 2023, Iss. 12, pp. 33–44. EDN: PDHDCS.

16. Serova, N. A. Methodical approach to assessing the development of regional transport infrastructure. *Fundamental research*, 2022, Iss. 10–2, pp. 229–232. EDN: YAFIHN. DOI: [10.17513/fr.43371](https://doi.org/10.17513/fr.43371).

17. Macheret, D. A., Kudryavtseva, A. V. Economic aspect of interaction of railways with other types of transport in the transportation market. *Transportnoe delo Rossii*, 2024, Iss. 1, pp. 70–74. EDN: JIWHFS.

Information about the authors:

Podsorin, Victor A., D.Sc. (Economics), Professor at the Department of Transport Economics and Management, Russian University of Transport, Moscow, Russia, podsorin@mail.ru.

Burovtsev, Vladimir V., D.Sc. (Economics), Professor at the Department of Management, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, burovtsevv@mail.ru.

Kobylitsky, Andrey N., Ph.D. (Economics), Associate Professor at the Department of Economics and Commerce, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, akobylitsky@mail.ru.

Kuranova, Anastasia A., Student, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk, Russia, kuranova-nastya@mail.ru.

Article received 26.12.2023, approved 08.04.2024, accepted 12.08.2024.





ORIGINAL ARTICLE

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-10>

The Influence of Train Composition on the Nature of the Impact of Factors Affecting Energy Consumption



Victoria V. VITOVSKAYA



Alexey I. DAVYDOV



Alexander A. KOMYAKOV

Victoria V. Vitovskaya¹, Alexey I. Davydov², Alexander A. Komyakov³^{1, 2, 3}Omsk State Transport University, Omsk, Russia.¹ORCID 0009-0001-3232-286X; Web of Science Researcher ID: HSH-1681–2023; Russian Science Citation Index SPIN-code: 2483–1615; Russian Science Citation Index Author ID: 1191684.²ORCID 0000-0002-8842-2800; Web of Science Researcher ID: E-1446–2019; Russian Science Citation Index SPIN-code: 9039–4400; Russian Science Citation Index Author ID: 653459.³ORCID 0000-0002-1960-3018; Web of Science Researcher ID: N-8824–2016; Russian Science Citation Index SPIN-code: 3775–1920; Russian Science Citation Index Author ID: 514132.✉ ¹vitovskaya.99@mail.ru.

ABSTRACT

Currently, the development of technical standards and functional operating standards of specific fuel and power consumption for railway traction on the railways of the Russian Federation and the CIS countries is carried out using methods developed back in the 60s of 20th century. The use of modern methods of data mining in calculating standards involves a preliminary study and selection of factors that have a significant impact on the amount of fuel and energy resource consumption.

The study is aimed at identifying differences in the nature of the impact of locomotive's operation indicators, such as sectional and technical speed, train weight, axle load, on the amount of specific energy consumption for railway traction for various types of railway cargo rolling stock. Particular attention in the article is paid to determining the nature of the influence of factors on the specific energy consumption of container trains.

The work uses the Student's t-test statistical data processing method used to determine the homogeneity of the studied samples, and the Pearson correlation analysis method for determining the coefficients of correlation

between the specific energy consumption for railway traction and the factors that presumably affect the value of this consumption. The multiple linear regression method is used to build regression models describing the dependence of the specific energy consumption for train traction on the influencing factors under consideration.

The article contains the results of checking the homogeneity of the studied samples of specific energy consumption in the form of Student's t-test values, scatter diagrams of the specific energy consumption depending on the value of the influencing factors, a description of the values of the calculated correlation coefficients for each studied group of cargo trains. The study also focuses on possible reasons entailing difference in the nature and degree of influence of factors for different types of cargo rolling stock.

The study argues for the need to develop a methodology for standard setting regarding consumption of fuel and energy resources for train traction, which allows considering the influence of train composition using modern data analysis methods.

Keywords: railway transport, energy consumption analysis, energy consumption standardisation, train composition, correlation analysis, container trains.

Funding: The study has been performed as part of the governmental assignment No. 109-00004-24-02 (research topic EKTY-2023–0003) for «Development of concept model of decision-making support system in the field of train traction fuel and power consumption analysis and forecast».

For citation: Vitovskaya, V. V., Davydov, A. I., Komyakov, A. A. The Influence of Train Composition on the Nature of the Impact of Factors Affecting Energy Consumption. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 200–207. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-10>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

Currently, the process of analysis, planning and standardisation of fuel and energy resources (FER) for train traction on the railways of the Russian Federation and the CIS countries is governed by various regulatory documents in the field of planning, standardisation, analysis and forecasting of fuel and energy resource consumption for train traction¹.

The planned volume of FER consumption for train traction is determined at an enterprise within the framework of allocated funding limits and considering the planned volume of transportation operations. Then, the corresponding volumes are calculated at various levels of the organisational structure of the rail industry. The specific consumption of fuel and energy resource is used as the main indicator of the energy intensity of the transportation process per ride and is considered as the ratio of the volume of energy consumption to the volume of operations expressed in the corresponding units.

To motivate the departments involved to respect the planned volumes of FER consumption, standards and rates for the specific consumption of fuel and energy resource for train traction are established: by type of resource (electric power, diesel fuel, gas, fuel oil, coal); by the level of standard and rate setting (technical standards, operational standards for locomotive crews, group standards for structural divisions and higher corporate entities); by type of traction; by type of traffic and operations performed; by work areas and by standardisation periods.

The most important vector for the analysis of the energy efficiency of the transportation process is establishment of technical and functional (for each operation) standards for locomotive crew rides. Technical standards for specific FER consumption are developed based on traffic mode maps depending on the series of rolling stock for each section, depending on the track profile with gradation by train weight, as well as axle load or train composition. The basic data for determining technical standards

are cumulated through trial rides of traction and energy mobile inspection laboratories, data on energy-optimal modes of train driving (using automated systems for constructing energy-optimal train schedules), as well as traction calculations performed both manually and using modern software. Functional (for each operation) standards for specific FER consumption are being developed to consider running conditions that differ from the average statistical ones provided for in the technical standard. Functional standards consider energy consumption for individual technological operations, such as idle time of rolling stock in working condition, catching up on the delay of passenger and cargo trains to get into the schedule, warming up cars of multiple unit rolling stock at layover points, respecting speed limit warnings, stopping to respect prohibiting signals, unscheduled stops, testing the train brakes en route after a long stop not provided for by the train schedule, etc.

Due to the significant complexity of performing rides with involvement of a traction and energy mobile inspection laboratory and the use of software packages for performing traction calculations, in practice, train driving instructors responsible for heat engineering widely use the statistical method for determining technical rates for specific FER consumption. In this case, from the general set of journeys of locomotives of each series of traction rolling stock, and for corresponding type of traffic, with trains of the corresponding weight (or with the corresponding load on the car axle) on a specific section, those rides are selected that, in the opinion of the train driving instructor, are exemplary and performed under average statistical conditions. The average value of the specific fuel and energy consumption for the specified samples, considering the factors for seasonality, weather conditions, the use of optimal train control methods (determined based on the expert assessment method), is considered the specific rate, which can be adjusted in case of deviation from the considered conditions of performing trips. Thus, the value of the calculated specific energy consumption rate for train traction contains a significant share of subjectivity, and the selected rides may not fully consider the potential of energy-efficient train operation methods and may contain errors inherent in previous rate setting. Besides, when upgrading the system for analysing and

¹ See, for example: STP BC 17.217–2012 Calculation of diesel fuel consumption rates for train traction for locomotive units of the Belarusian Railway. Minsk, Ministry of Transport and Communications of the Republic of Belarus, 2012, 23 p; Regulation on the planning and standardisation of fuel and energy resource consumption for train traction at JSC Russian Railways. Approved by the order of JSC Russian Railways dated May 17, 2019, No. 962/r.



standardising energy consumption for train traction, it is necessary to consider the capabilities of modern computing tools, as well as data mining methods.

The *objective* of the work was to study differences in the nature of the influence of factors on the value of specific electric power consumption for the types of cargo trains most widely used on the railways of Russia and the CIS countries.

MATERIALS AND METHODS

Many foreign [1–8] and domestic studies [9–15] are devoted to identifying and studying the factors influencing the energy consumption of a train.

Traditionally, the analysis focuses on the impact on the value of specific electric energy consumption w_{spec} (SEC) of the following features of locomotive operation: sectional speed V_{sec} , technical speed V_{tech} , mass of the train m_t , axle load q . To determine the nature of the impact of the listed factors on the value of SEC, an analysis is provided of data on more than 9000 trips of electric trains made by locomotive crews of one of the operational locomotive depots of the West Siberian Railway for the period from October 2022 to April 2023. The main source of information on the values of influencing factors is the data of the centralised train driver's route processing system (CDRPS). The Microsoft Excel spreadsheet processor and the Visual Basic for Applications programming language allows calculating the values of series of factors, information about which is contained in the reporting forms in an implicit form (SEC, train mass, axle load).

The study of the nature of the influence of factors is conducted for 5 groups of trains: the totality of all types of cargo trains (group 1), through trains (group 2), through trains weighing more than 5500 tons (group 3) and less than 5500 tons (group 4) and container trains (group 5). This partition is explained by a few distinctive features in organisation of the transportation process for the rolling stock representing each group. For example, through trains weighing more than 5500 tons are often trains with bulk liquid cargo, trains with a high rate of utilisation of wagon load capacity. In turn, container trains have following distinctive features: low axle load of the wagon, relatively small mass of trains, the use of a special type of rolling stock, flatcars, for transportation of containers. Through trains

weighing less than 5500 tons are allocated to a separate group due to the presence of similar features with container trains: low mass and axle load. The data set representing group 1 is the general sample in this study. The sample of the second group contains data on the journeys of all through trains, excluding data on the trips of container trains.

To check the presence of a dependence of the nature of the impact of factors on the type of rolling stock, we study the homogeneity of samples as for SEC of groups 2 and 5 and groups 4 and 5 of trains using the Student *t*-test method [16]. The use of the traditional method of statistical analysis is acceptable, since the samples are independent of each other, and the number of observations in the samples is large [17].

The correlation analysis was preceded by building scatter diagrams w_{spec} depending on the magnitude of the influencing factors under study.

The degree of influence and the nature of the impact of factors are determined using the Pearson correlation analysis method, including the calculation of the coefficients of correlation r and construction of correlation matrices.

The calculation of the coefficient of correlation is carried out according to the expression:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x \cdot S_y \cdot (n-1)}, \quad (1)$$

where x_i, y_i are i^{th} values of random variables;
 \bar{x}, \bar{y} are average values of random variables;
 n is sample size;

S_x, S_y are standard (average square) deviations of random variables.

The strength of the correlation is assessed in accordance with the Chaddock scale.

The construction of regression models for SEC relative to four factors under study is carried out using the multiple linear regression method. In this paper, two regression models are constructed. The first model is implemented based on the data of the general population, the second – on the data on the trips of container trains only. The samples are divided into two parts: data on 80 % of the trips are used directly in construction of the model, the remaining 20 % (test sample) – in assessing the accuracy of the model. The general form of the resulting regression equations is described by the expression:

$$w_{spec} = \Delta_0 + \Delta_1 V_{sec} + \Delta_2 V_{max} + \Delta_3 m_t + \Delta_4 q, \quad (2)$$

where Δ_j are j^{th} coefficients of regression equation.

Table 1

Empirical values of the t -criterion for the studied samples [obtained by the authors]

Period	Studied samples			
	Groups 2 and 5		Groups 4 and 5	
	odd direction	even direction	odd direction	even direction
January	-7,89	-8,69	1,12	-3,89
February	-5,13	-3,06	1,23	0,08
March	-5,92	-2,6	-0,73	0,13
April	-5,76	-3,54	-0,09	-0,55
October	-4,1	-7,76	3,01	-3,46
November	-3,76	-4,28	4,88	-1,05
December	-4,83	-5,46	4,15	-1,07
7 months	-13,78	-13,08	5,25	-3,65

The accuracy of the models is tested using the SEC values of container trains from the test sample.

RESULTS

Based on the results of Student's statistical analysis, Table 1 was compiled, which reflects the empirical t_{emp} t -criterion values for the studied samples. The critical value of the criterion t_{crit} at a significance level of 0,05, determined according to the statistical table [18], is 1,96 for all studied samples, since the number of degrees of freedom in them exceeds 120.

According to the data in Table 1, all the studied samples of SEC of groups 2 and 5 turned out to be heterogeneous. When compared with the samples of SEC of groups 4 and 5, the samples are homogeneous in 9 out of 16 cases. The presence of heterogeneity in the compared samples allows us to conclude that there are differences in the nature of the impact of influencing factors (train weight, axle load, train speed, etc.) on the SEC value for the studied types of cargo trains. Moreover, heterogeneity with the samples of trains of group 4 may mean that the reason for differences in the nature of the impact of influencing factors on container trains compared to others is not associated only with their relatively small weight.

Before conducting the correlation analysis, the scatter diagrams of SEC value depending on the magnitude of the influencing factors were examined. As an example, Pic. 1 shows scatter diagrams for trips made in April 2023 for group 1 under study. The diagrams have a similar appearance for all studied train groups.

Visual analysis of scatter diagrams allows us to assume a weak and very weak correlation between w_{spec} and V_{sec} (Pic. 1a), between w_{spec} and V_{tech} (Pic. 1b), medium and strong correlation

between w_{spec} and m_t (Pic. 1c) and between w_{spec} and q (Pic. 1d).

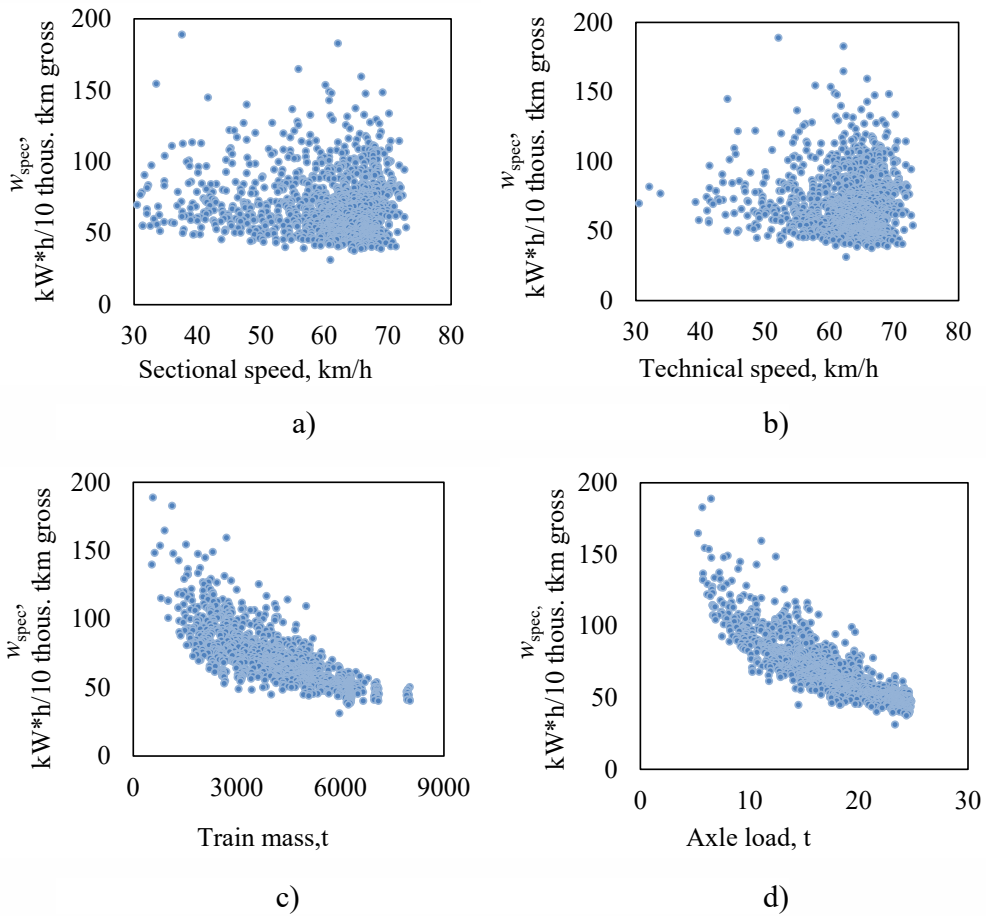
Let us consider the results of the study of correlations between w_{spec} and sectional (V_{sec}) and technical (V_{tech}) speeds, train mass m_t and axle load q .

Sectional speed V_{sec} is the average value of the train speed considering the time of stops, time for deceleration and acceleration. Technical speed V_{tech} , unlike sectional speed, does not consider the time of stops. Depending on the selected train operation mode, an increase in the average speed can lead to both an increase and a decrease in SEC [19]. The analysis has shown that the correlation between SEC and sectional speed V_{sec} and technical speed V_{tech} is characterised as weak. The coefficient of correlation with the sectional speed $r_{V_{sec}}$ varies in the range from -0,17 to 0,09, the coefficient of correlation with the technical speed $r_{V_{tech}}$ – in the range from -0,12 to 0,11. The largest negative coefficients of correlation by absolute value are characteristic of trains of group 3, and the largest positive ones are characteristic of trains of groups 4 and 5.

A negative effect of the sectional and technical speed on SEC is noted for trains of group 3, which may be associated with significant energy consumption for accelerating trains weighing more than 5500 tons after a stop. The existence of statistically significant positive coefficients of correlation with the speeds of container trains and trains weighing less than 5500 tons is due to the fact that the trains of the smallest mass in these groups, which, as a rule, have a higher specific consumption, also have the highest speed.

The correlation between SEC and the mass of the train, according to the scatter diagram in Pic. 1c, should be characterised as strong or very strong. The conducted correlation analysis yielded the following results:





Pic. 1. Scatter diagrams of w_{spec} values depending on the value of:
a) – sectional speed V_{spec} , b) – technical speed V_{tech} ,
c) – train mass m_t , d) – axle load q [obtained by the authors].

– the coefficient of correlation of SEC with the mass of the train r_m has negative values for all the studied train groups during each time period;

– the modulus of the correlation coefficient r_m has the highest values for groups 1 and 4 and varies in the range from 0,91 to 0,67 with a predominance of a strong correlation;

– the smallest values of the modulus of the correlation coefficient, in the range from 0,60 to 0,21 with a predominance of an average correlation, are characteristic of trains of groups 3 and 5, even though the average masses of these groups differ by more than two times.

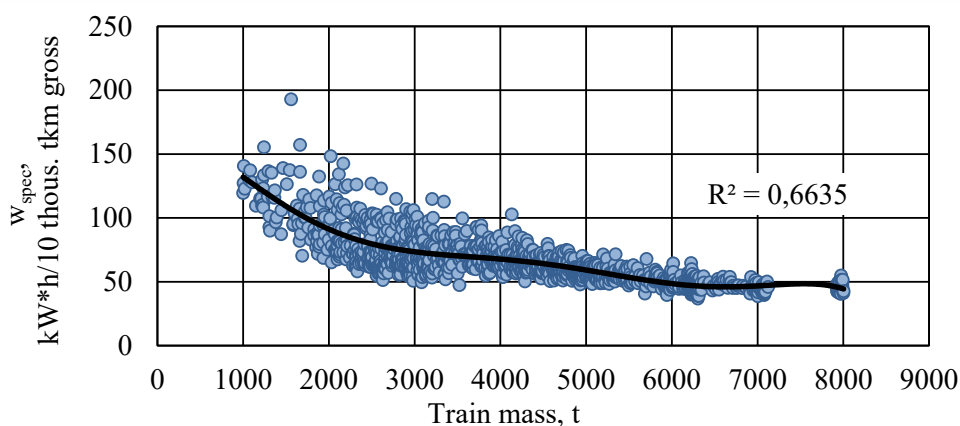
Pic. 2 shows a graph of the dependence of SEC on m_t for trips in October. The lower values of r_m for trains of group 3 may be due to the fact that for an electric locomotive with large masses of a train, operating conditions are created in a mode close to the nominal one, where the current loads have optimal values. A further

increase in the mass of the train will lead to an increase in SEC [20].

The range of values of the masses meeting optimal values of SEC corresponds to the horizontal section of the approximating curve. The curve, having passed the minimum point, will begin to raise. However, this is not reflected in Pic. 2, since there are no data on operation of trains weighing more than 9000 tons on the section under study.

To clarify the reason for the weaker nature of the influence of the change in m_t on SEC for container trains, scatter diagrams of the masses of trains were constructed depending on the number of axles for container trains (Pic.3a) and for the set of other groups of cargo trains (Pic.3b).

Based on the range of mass changes for each number of axles in Pic.3a, the increase in the mass of container trains is mainly due to the increase in the number of axles. The change in



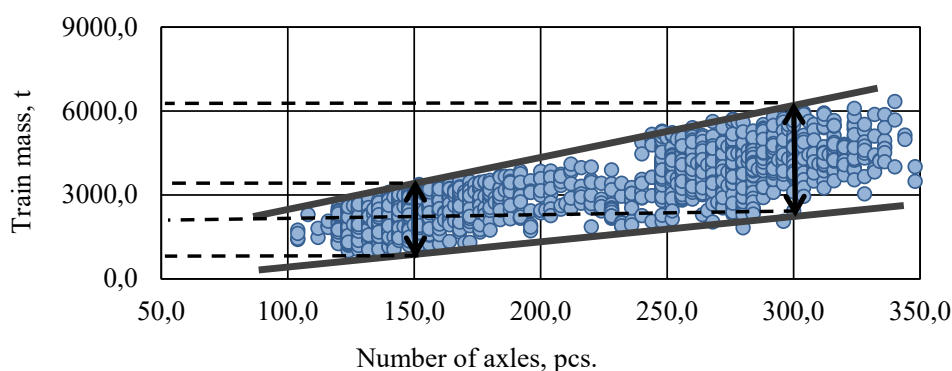
Pic. 2. Dependence of specific energy consumption on the train mass [obtained by the authors].

mass for other cargo trains is due to the increase in axle load to a greater extent than for container trains. This may explain the weaker effect of increasing m_t on reducing SEC for container trains.

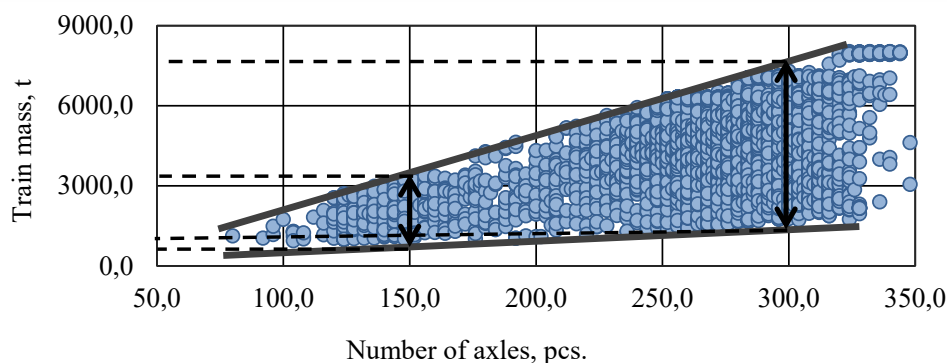
Increasing m_t by adding axles leads to a greater increase in the resistance to train

movement than by increasing q , since some components of the main resistance to train movement do not depend on q , for example, air resistance.

The analysis of correlation of the relationship between the value of SEC and the car axle load q has the following results:



a



b

Pic. 3. Range of masses per number of axles for: a – container trains, b – cargo trains [obtained by the authors]

Table 2

Results of construction and testing of regression models [obtained by the authors]

	Δ_j -coefficient	p-value	R^2	δ , %
Model 1 (based on data on all trips)				
Δ_0	133,223		0,81	10,77
V_{sec}	-0,102	0,018		
V_{tech}	0,179	0,001		
m_t	-0,003	0		
Q	-3,192	0		
Model 2 (based on data on container trains)				
Δ_0	146,793		0,65	9,92
V_{sec}	-0,097	0,251		
V_{ech}	0,165	0,108		
m_t	-0,006	0		
q	-3,579	0		

– coefficient of correlation of SEC with the axle load r_q , like r_m , has negative values for all the studied samples;

– modulus of the coefficient of correlation r_q has the highest values for the same groups of trains as the modulus r_m and varies in the range from 0,83 to 0,91;

– the lowest values of the modulus of the coefficient of correlation, in the range from 0,44 to 0,78 with a predominance of the average correlation relationship, are characteristic of trains of groups 4 and 5;

– r_q modules for container trains have values on average 1,4 times greater than r_m modules, for other groups of trains – on average 1,2 times greater.

The results of constructing regression models are shown in Table 2, which summarises the values of Δ regression coefficients, R^2 determination coefficients, p -values, and δ average values of relative errors of models.

The use of model 1 for calculating w_{spec} of container trains yielded an average relative error of 10,77 %, given that in the general population, container train traffic makes up 25,9 %.

Based on R^2 value obtained for model 2, only 65 % of the w_{spec} variance can be explained by the factors under consideration. Excluding the variables V_{sec} and V_{tech} does not increase R^2 value, but the standard regression error decreases from 3,41 to 1,29. To improve the accuracy of the second model, it is necessary to consider other influencing factors, such as weather conditions.

Preliminary regression analysis, considering additional factors, showed that it is possible to reduce δ to 4,87 % for model 2 and to 9,31 % for

model 1. The second model has greater potential for increasing accuracy when weather conditions are included in it, which is the subject of further research. To confirm the presence of a relationship between the nature of the influence of factors on the value of specific energy consumption and the composition of trains, similar studies are required for other sections of the rail network.

CONCLUSION

The approaches to the analysis, planning, rate and standard setting of FER currently used on the railways of the Russian Federation and the CIS countries do not allow for the calculation of predicted values of FER consumption for traction, considering the composition of trains.

The article contains the analysis of data on trips made on the territory of the Russian Federation within the boundaries of the West Siberian Railway. Checking the data on specific energy consumption using the Student's t -test for different types of cargo trains showed the heterogeneity of the studied samples. The conducted Pearson correlation analysis allowed us to describe the nature and degree of the impact of influencing factors on the specific energy consumption of the studied types of cargo trains. Significant differences are noted in the influence of the mass of the train and axle load on the specific energy consumption of container trains and trains weighing more than 5500 tons.

Partition of trains according to characteristic features into separate groups allows for an individual selection of influencing factors that have a significant impact on energy consumption. This makes it possible to increase the accuracy

of models for predicting the values of specific energy consumption for each type of train.

REFERENCES

1. Ren Junhua, Zhang Qing, Liu Feng. Analysis of factors affecting traction energy consumption of electric multiple unit trains based on data mining. *Journal of Cleaner Production*, 2020, Vol. 262, 121374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121374>.
2. Fischer, S. Traction energy consumption of electric locomotives and electric multiple units at speed restrictions. *Acta Tech. Jaurinensis*, 2015, Vol. 8, Iss. 3, pp. 240–256. DOI: <https://doi.org/10.14513/actatechjaur.v8.n3.3>.
3. Kampczyk, A., Gamon, W., Gawlak, K. Integration of Traction Electricity Consumption Determinants with Route Geometry and Vehicle Characteristics. *Energies*, 2023, Vol. 16, 2689. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16062689>.
4. Pan Deng, Chen Zejun, Mei Meng. Energy efficiency emergence of high-speed train operation and systematic solutions for energy efficiency improvement. *SN Applied Sciences*, 2020, Vol. 2, article number 875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2692-5>.
5. Lukaszewicz, P. Running resistance—results and analysis of full-scale tests with passenger and freight trains in Sweden. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2007, Vol. 221, Iss. 2, pp. 183–193. DOI: [10.1243/0954409JRRTR89](https://doi.org/10.1243/0954409JRRTR89).
6. Rozhkov, A., Suyunbaev, Sh., Salfetnikov, V., Balabaev, O., Nartov, M. Determination of Additional Resistance to Train Movement from Profile Elements of Railway Sidings of Industrial Facilities. *Trudy universiteta*, 2022, Iss. 2 (87), pp. 211–216. DOI: [10.52209/1609-1825_2022_2_211](https://doi.org/10.52209/1609-1825_2022_2_211).
7. Boschetti, G., Mariscotti, A. The Parameters of Motion Mechanical Equations as a Source of Uncertainty for Traction Systems Simulation. XX IMEKO World Congress, 2012, Busan, South Korea. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/publication/265843501_The_parameters_of_motion_mechanical_equations_as_a_source_of_uncertainty_for_traction_systems_simulation. Last accessed 19.01.2024.
8. Rochard, B., Schmid, F. A review of methods to measure and calculate train resistances. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2000, Vol. 214, Iss. 4, pp. 185–199. DOI: [10.1243/0954409001531306](https://doi.org/10.1243/0954409001531306).
9. Sidorova, N. N. Evaluation of Power Inputs Caused by Unscheduled Stops. *World of Transport and Transportation*, 2013, Vol. 11, Iss. 4 (48), pp. 48–51. EDN: PZREOZ.
10. Cheremisin, V. T., Nezevak, V. L., Sarkenov, S. S. Influence of traction load on power consumption in the traction power supply system on sections with a mountainous track profile [Vliyaniye tyagovoi nagruzki na elektropotrebleniye v sisteme tyagovogo elektroosnabzheniya na uchastkakh s gornym profilom puti]. *Bulletin of Rostov State Transport University*, 2019, Iss. 1 (73), pp. 112–118. EDN: ZBKLP.
11. Medlin, R. Ya., Sidorova, E. A. Standardization of energy resource consumption [Normirovaniye raskhoda energoresurov]. *Elektricheskaya i teplovznoyaya tyaga*, 1989, Iss. 2, P. 4.
12. Baklanov, A. A., Domanov, K. I., Esin, N. V. [et al]. Classification of factors affecting the power consumption of electric rolling stock. *Innovative transport*, 2020, Iss. 4 (38), pp. 61–66. DOI: [10.20291/2311-164X-2020-4-61-66](https://doi.org/10.20291/2311-164X-2020-4-61-66).
13. Shkurin, K. M. Study of the influence of the mass of cargo trains on their section speed [Issledovaniye vliyaniya massy gruzovykh poezdov na ikh uchastkovuyu skorost]. *Bulletin of Belarusian State University of Transport: Science and Transport*, 2018, Iss. 1 (36), pp. 70–72. EDN: YWIHYD.
14. Isaev, I. P., Sidorova, N. N., Feoktistov, V. P. Standardization of energy consumption in cargo traffic based on statistical methods [Normirovaniye raskhoda energii v gruzovom dvizhenii na osnove statisticheskikh metodov]. *Railway transport. Series: Locomotives and locomotive fleet*, 1988, Iss. 5, pp. 1–15.
15. Sidorova, N. N. Analysis of energy intensity of the transportation process in electric traction based on a multifactor model [Analiz energoemkosti perevoznogo protsessa v elektricheskoy tyage na osnove mnogofaktornoy modeli]. *Bulletin of MIIT. Scientific and technical journal*, 2000, Iss. 5, pp. 23–27.
16. Gmurman, V. Probability Theory and Mathematical Statistics [Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika]. Moscow, Vysshaya shkola publ., 1977, 429 p.
17. Orlov, A. I. Testing the statistical hypothesis of homogeneity of mathematical expectations of two independent samples: the Cramer-Welch criterion instead of the Student's criterion [Proverka statisticheskoy gipotezy odnorodnosti matematicheskikh ozhidaniy dvukh nezavisimyykh vyborok: kriteriiy Kramera-Uelcha vmesto kriteriya Studenta]. *Polythematic online electronic scientific journal of Kuban State Agrarian University*, 2015, Iss. 110 (06), pp. 197–218. [Electronic resource]: https://orlovs.pp.ru/work/901-1000/954_%20Критерий%20Крамера-Уэлча.pdf. Last accessed 19.01.2024.
18. Bolshev, L. N., Smirnov, N. V. Tables of mathematical statistics [Tablitsy matematicheskoy statistiki]. Moscow, Nauka publ., 1965, 464 p.
19. Baklanov, A. A. The influence of travel speed on energy consumption of cargo trains [Vliyaniye skorosti dvizheniya na energozatraty gruzovykh poezdov]. *Izvestiya Transsiba*, 2018, Iss. 1 (33), pp. 2–12. EDN: XQXUWT.
20. Wilhelm, A. S., Ivanchenko, V. I., Komyakov, A. A., Shtraukhman, A. A. Determining optimal values of operational indicators of electric rolling stock according to the energy efficiency criterion [Opredeleniye optimalnykh znacheniy ekspluatatsionnykh pokazateley elektropodvizhnogo sostava po kriteriyu energoeffektivnosti]. *Izvestiya Transsiba*, 2021, Iss. 4 (48), pp. 85–96. [Electronic resource]: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2021-4\(48\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2021-4(48).pdf) [full text of the issue]. Last accessed 19.01.2024. ●

Information about the authors:

Vitovskaya, Victoria V., Ph.D. Student at the Department of Theoretical Electrical Engineering, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, vitevskaya.99@mail.ru.

Davydov, Alexey I., Ph.D. (Eng), Associate Professor at the Department of Computer Science and Computer Graphics, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, davydovai@bk.ru.

Komyakov, Alexander A., D.Sc. (Eng), Associate Professor, Professor at the Department of Theoretical Electrical Engineering, Omsk State Transport University, Omsk, Russia, tskom@mail.ru.

Article received 21.01.2024, approved 26.03.2024, accepted 30.03.2024.





Building an Airline Strategy



Olga P. SUSHKO

Olga P. Sushko

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia.

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-0865-6621>; Web of Science Researcher ID:

F-4750–2019; Scopus Author ID: 56747827800; Russian Science Citation Index SPIN-code: 5806–8449; Russian Science Citation Index Author ID: 833150.

✉ osushko@mail.ru.

ABSTRACT

The need for adaptation and development of airlines under the conditions of complex and dynamic environment determines comprehensive strategising on their activities based on identification of strengths and weaknesses, opportunities and threats. The objective of the study is to conduct a comprehensive analysis of an airline's activities with the allocation of the main development areas necessary for strategy development. The research was based on the scientific principles of a system approach, while a variety of empirical methods, including statistical analysis tools were applied to comprehensively study different activity areas.

The scheme of building an airline's strategy includes performance analysis and problem decomposition with subsequent aggregation and ranking of development strategies. The approach to strategising on airline activities based on internal and external factors analysis summary (IFAS / EFAS) and OTSW

analysis reveals many new threats. In this case, the main (Maxi-Maxi or Maximax) strategy of the airline development should consider the effective use of existing opportunities and accumulated capacity. OTSW analysis is a method of strategic planning based on a modification of the SWOT analysis. It includes the study of the factors of internal and external environment. To conduct this analysis, an OTSW matrix is created, which allows comparing external opportunities and threats with internal strengths and weaknesses selected based on expert assessments. Following the results of the analysis, it can be concluded that one or another airline has several opportunities and is exposed to potential threats imposed by the impact of economic, political, social and technological factors. The main (Maxi/Maxi) development strategy of an airline should be aimed at using existing opportunities and capacity, providing for revealing, introducing and implementing of most promising strategic trends.

Keywords: airline, strategising on activity, OTSW analysis, Maxi/Maxi strategy.

For citation: Sushko, O. P. Building an Airline Strategy. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 208–217. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-11>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

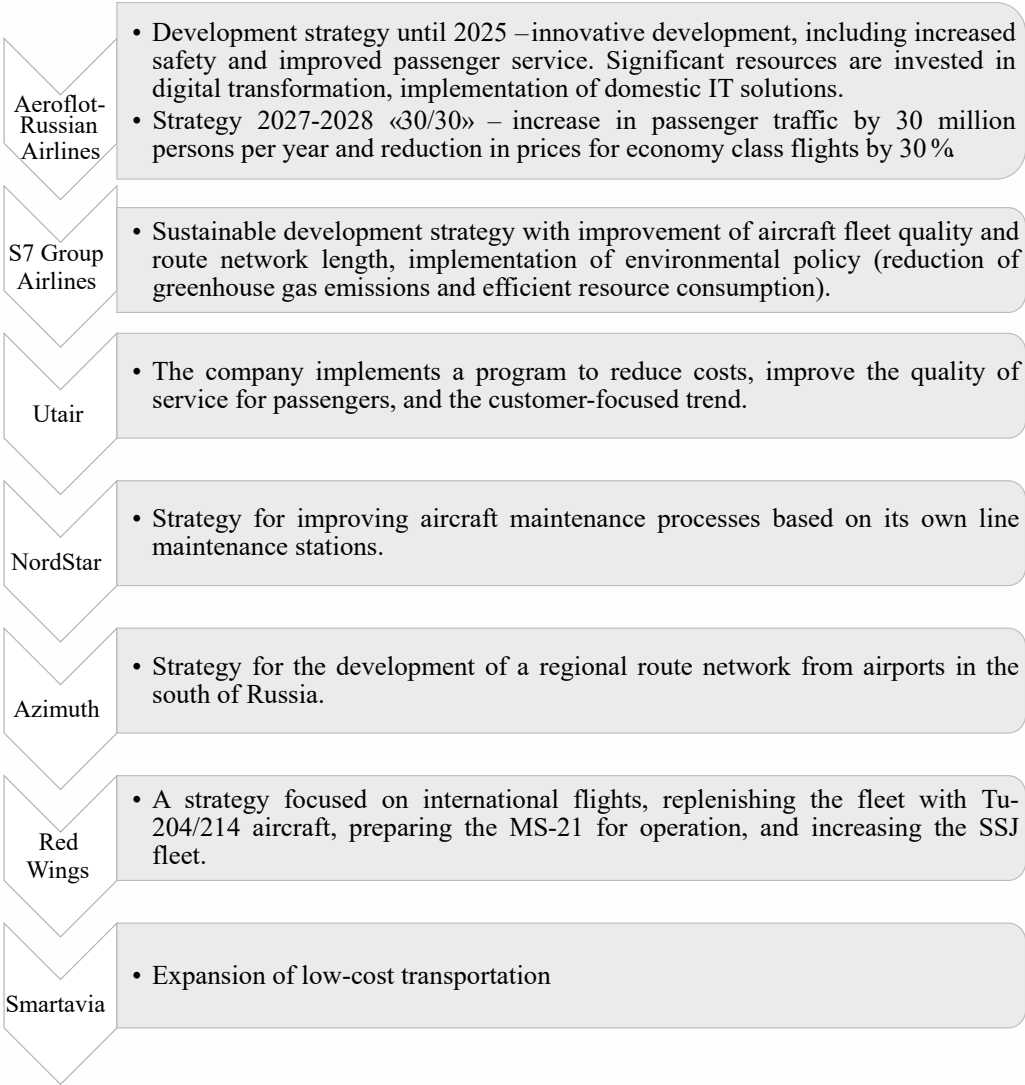
MATERIALS AND METHODS

Civil aviation is important for the economy of any country, and for Russia with its large territory and geographical scale, this industry provides great opportunities for development and becomes irreplaceable in some situations. Thus, for the regions of the Far North, Siberia, and the Far East, air transportation is the main tool of transport connectivity with other regions of the country.

Russian airlines implement the approved strategic development plans (Pic. 1).

The *scientific problem of the research* is defined as a comprehensive strategising on activity with identification of strengths and weaknesses, opportunities and threats, the

solution of which will allow obtaining scientifically based recommendations for the development of airline development strategies in conditions of uncertainty. The object of the research is the activity of the leading airlines of the Russian Federation. The information base of the research includes statistical data, airlines data, and other sources. The theoretical and methodological foundations of the research are scientific provisions of the systems approach. The study used empirical methods as well as expert methods and consulting sessions with industry experts, which allowed obtaining high-quality assessments on airlines strategies. The scientific novelty of the study is determined by the adaptation of the OTSW analysis methodology,



Pic. 1. Some key aspects of strategic plans of Russian airlines
[compiled by the author based on open-source data].



the Delphi method, the external and internal factors analysis summary (IFAS / EFAS), etc. to the strategising on the airlines' activity.

DISCUSSION

The significance of increasing the competitiveness of transport companies predetermines the relevance of the study on their development strategies under modern conditions. In this regard, several works of Russian researchers can be mentioned that were devoted to different aspects of the topic. Thus, O. I. Dontsova, A. V. Volokhov, D. E. Morkovkin studied global prospects for the development of civil aviation [1]. D. G. Kakhrianova and M. A. Okolov studied the trends in the development of the Russian air transportation industry [2]. M. M. Brutyan analysed the Indian air transportation market and identified the prospects for its development [3]. Research on the development prospects of other modes of transport is also relevant [4–7]. A. V. Korolev substantiated the approaches to developing a strategy for passenger transport under new conditions of reorganisation of integration processes [8]. The concept of strategy development is becoming increasingly in demand and aimed at the practical implementation of theoretical foundations and methodological provisions. Yu. V. Nesterov and A. B. Fraiman established the importance of the paradigm of strategic management of air transport [9].

At the same time, the methodology of strategisation intended for enterprises, industries, complexes, regions in the modern period is in the process of formation. The methodology of strategisation was introduced in Russian science and practice by V. L. Kvint [10; 11]. V. L. Kvint suggests using the SWOT analysis method as a basis with further decomposition of factors by levels of strategic directions, which will allow developing effective development strategies [12; 13]. In the strategy, much attention is paid to the analysis of factors of the external and internal environment, therefore many researchers conduct factor analysis. Among the recent works related to the study of the factors of environment, one can note the work of I. V. Zakharova [14]. S. E. Ramenskaya and Yu. V. Fisun presented an analysis of the choice of development strategy for an airline [15].

Despite the studies being conducted, the relevance of the topic of strategising activities and devising an effective development strategy

for an airline, including considering factors of uncertainty and constant political and economic changes, requires new research.

RESEARCH RESULTS

The general scheme of strategising on the activities of airlines includes analysis of the functioning and decomposition of problems with subsequent aggregation and ranking of development strategies (Pic. 2).

An analysis of four groups of factors of the external environment of the airline's activities is carried out.

The first group of factors includes political factors, both external including changes in geopolitical situation, and internal, aimed at development of air transportation, e.g. the state program to support the air transportation industry, adopted in 2022¹.

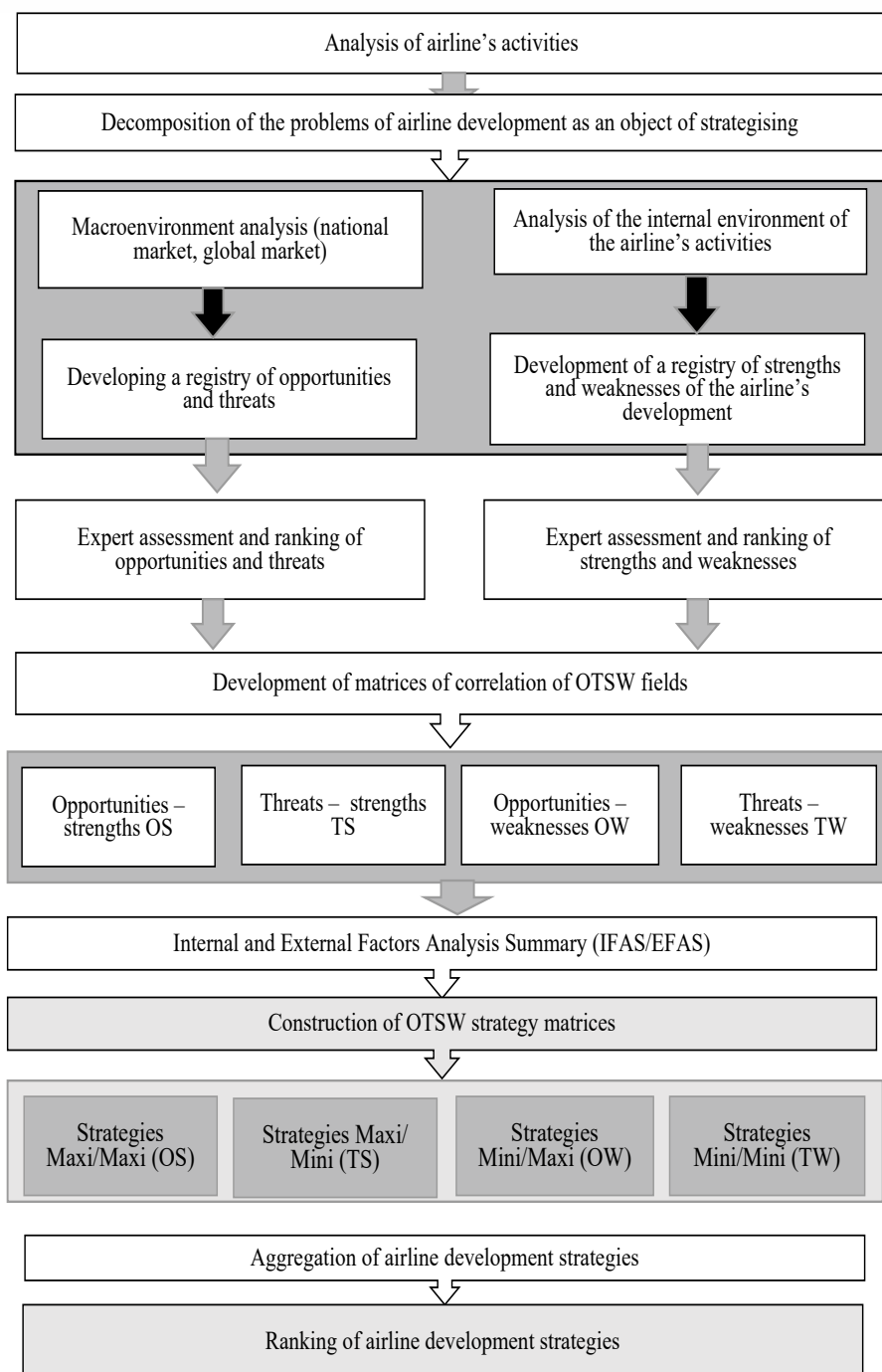
An analysis of economic factors has shown that several significant determinants can be outlined:

1. Changes in fuel prices, aircraft rental, etc., and therefore, in airline revenues.
2. Fluctuations in passenger demand for air travel.
3. An increase in the tax load on airlines, including due to an increase in excise taxes on fuel, which may increase the costs of air carriers and create an additional financial burden.
4. Government subsidies (particularly, due to them the net profit of airlines has increased significantly in 2023).

Social factors can have a positive or negative impact on airline operations:

1. Demographic trends can affect the need for air travel and depending on this create opportunities for new routes or reduce demand for existing ones.
2. Changes in consumer habits and preferences of air passengers may lead to a decrease in demand for some routes or, on the contrary, to an increase for others.
3. Increased access to data and services leads to air passengers becoming more informed. This allows them to compare offers from different airlines more easily, which in turn increases the level of competition: companies are forced not only to improve the quality of their goods and

¹ Order of the Government of the Russian Federation of June 25, 2022, No. 1693. [Electronic resource]: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/404798711/?ysclid=lv5ndpc80898790885>. Last accessed 27.05.2024.



Pic. 2. Algorithm for strategising airline's activities [developed by the author based on experimental data and open-source data].

services, but also to offer more flexible and attractive conditions to retain passengers.

Important factors of the macroenvironment are technological aspects that are positive for the activities of airlines:

1. Processes of automation processes improve the overall quality of passenger service and

ensure the minimisation of costs of the airline.

2. New aviation technologies ensure the reliability and safety of flights and reduce operating costs.

3. Increased equipment productivity provides airlines with the opportunity to use their resources more efficiently.



Table 1
Elements of decomposition of factors of the competitive environment of an airline

No.	Elements of decomposition of competitive environment factors	Experts' assessments
1	Degree of differentiation of goods/services of the airline	2/3
2	The share of passenger purchases in the airline's sales volume	1/3
3	Passenger income level for the target segment	2/3
4	The share of airline's services in the structure of passenger purchases	3/3
5	Excellence of airline's services	4/3
6	Availability of information about airline services and the whole civil aviation industry	2/3
7	Cost of refocusing a passenger of the target segment to other airline services	4/3
8	Barriers to airline's exit from the air transportation industry	3/4
9	The degree of diversification of the air transportation business	4/3
10	Potential of the air transportation market	3/4
11	Airlines' pursuit of the «experience curve» effect	2/1
12	The amount of capital investment required for an airline to enter the air transportation market	3/4
13	Prices that hinder entry into the air transportation market	2/3
14	The activity of airlines in response to the market penetrating by new companies	3/2
15	Level of government support for airlines	4/3
16	Availability of distribution channels for new airlines	2/2
17	Airline brand loyalty	3/3
18	Number of analogues of airline services on the market	1/1
19	Degree of differentiation of airline services	2/2
20	Importance of passenger purchase volume for suppliers	4/3
21	Coordination of airlines' activities	4/3
22	Price/quality ratio level for airline service substitute	2/2
23	Profitability of airline services – substitutes for airline services	3/2

Source: developed by the author based on experimental data and open-source data.

Table 2
Determination of the force of factors' pressure on the airline's activities

J	Causal factors	Influence of the factor on the resulting assessment	Factor weight (W)	Average assessment of the expert factor	Assessment considering the influence of the factor (X)	W*X
1	Degree of differentiation of airline services (low – high)	–	0,17	2	5–2 = 3	0,56
2	Share of air passenger in airline's sales (small – large)	+	0,16	1	1	0,16
3	The share of airline services in the structure of passenger purchases (small – large)	–	0,15	3	5–3 = 2	0,30
4	Income level of passengers within the target segment (low – high)	+	0,21	3	3	0,63
5	Quality of airline services (low – high)	–	0,19	3	5–3 = 2	0,38
6	Passenger access to information about airline services and the air transportation industry (limited – free)	+	0,11	2	2	0,21
Assessing the force of pressure on the airline from air passengers						2,23
1	Air transportation market growth potential (small – large)	-	0,19	4	5–4 = 1	0,19
2	The magnitude of barriers to airline's exit from the air transportation industry (low – high)	+	0,24	4	4	0,95

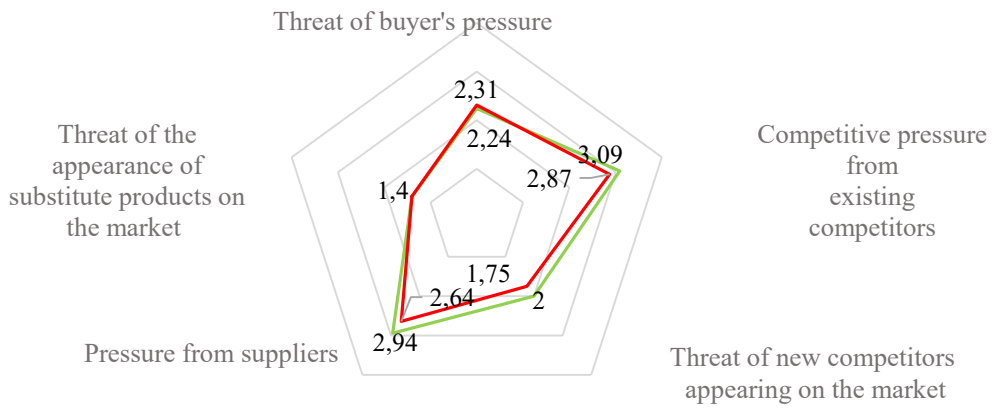
Table 2

Determination of the force of factors' pressure on the airline's activities (end of the table)

J	Causal factors	Influence of the factor on the resulting assessment	Factor weight (W)	Average assessment of the expert factor	Assessment considering the influence of the factor (X)	W*X
3	Cost of switching target segment's air passengers to other airline services (low – high)	–	0,15	3	5–3 = 2	0,33
4	Airlines' focus on the «experience curve» effect (weak – strong)	+	0,16	4	4	0,64
5	Degree of diversification of the airline's activities (low – high)	–	0,24	1	5–1 = 4	0,96
Assessing the pressure on the airline from existing competitors						3,09
1	Air transportation price trends that deter market entry (low – high)	–	0,06	3	5–3 = 2	0,12
2	Airline's activity in response to new airlines' attempts to enter the market (low – high)	–	0,10	3	5–3 = 2	0,20
3	Level of capital investment for an airline to enter the air transportation industry (low – high)	–	0,24	3	5–3 = 2	0,50
4	Degree of loyalty of passengers of the target segment to the airline brand (low – high)	–	0,25	3	5–3 = 2	0,50
5	Availability of distribution channels in the air transportation industry for new airlines (low – high)	+	0,2	2	2	0,40
6	Degree of government support for airlines already operating in the air transportation industry (low – high)	–	0,15	3	5–3 = 2	0,32
Assessing the pressure on the airline from new competitors						2,00
1	Number of interchangeable services in the air transportation market (small – large)	–	0,25	1	5–1 = 4	1,00
2	Level of differentiation of airline services (low – high)	+	0,23	2	2	0,46
3	Importance for suppliers of passenger purchase volume (low – high)	–	0,3	3	5–3 = 2	0,6
4	Degree of coordination of airlines' activities (low – high)	+	0,21	4	4	0,84
Assessing the pressure on an airline and competitors from suppliers						2,94
1	Price/quality ratio of airline services (low – high)	–	0,7	4	5–4=1	0,70
2	Profitability of airline services substituting existing airline services (low – high)	+	0,3	2	2	0,60
Assessing the pressure on an airline and competitors due to the emergence of substituting airline services						1,30

Source: developed by the author based on experimental data and open-source data.





Pic. 3. Competitive benchmarking radar diagram
[developed by the author based on experimental, simulated and open-source data].

Table 3

Key opportunities and threats to airlines based on OTSW analysis

	Opportunities		Strengths
O1	Route network expansion: The company can expand its route network to attract more passengers and increase its market share.	S1	Wide route network: the airline operates regular flights to various regions of Russia and beyond, providing passengers with a wide choice of destinations.
O2	Implementation of new technologies: The airline may implement new technologies such as online booking systems to provide more convenient and faster access to services.	S2	Competitive prices: The airline offers affordable ticket prices, including special fares.
O3	Improving additional services: The company can improve its baggage and transportation services to attract new and retain existing passengers.	S3	Passenger safety: The company actively implements safety and security measures and technological innovations to ensure safe flight.
O4	Expanding cooperation with other airlines to facilitate passenger transfers between flights, and interaction not only with airlines but also with other businesses in various industries to increase brand awareness and attract new customers		
	Threats		Weaknesses
T1	Competition with other airlines offering similar services and prices.	W1	Small market share: The airline has a small share of the air travel market, making it difficult for it to compete with larger companies.
T2	Reduction in the number of travellers and, accordingly, a decrease in passenger traffic.	W2	Lack of a loyalty program for passengers: Compared to other leading airlines, the airline is far behind them in this regard.
T8	Increase in fuel costs: Volatility in fuel prices is a significant threat to airlines as it significantly impacts their financial sustainability.	W3	Outdated airline fare groups: Due to the unstable market of some airline services and strong competition from other airlines, the airline needs to adapt its policies to strengthen its competitiveness and attractiveness to passengers.

Source: developed by the author based on experimental data.

Expert assessments of :

the degree of significance of the i^{th} strength for using the k^{th} opportunity;

the degree of significance of the i^{th} strength for counteracting the m^{th} threat;

the degree of influence of the j^{th} weakness on the prospects for using the k^{th} opportunity;

the degree of influence of the j^{th} weakness on the aggravation of the possible consequences of the implementation of the m^{th} threat;

the probability of occurrence of the k^{th} opportunity;

the degree of significance of the k^{th} opportunity for business development;

probability of occurrence of the m^{th} threat;

the severity of possible consequences when the m^{th} threat is realized.

Pic. 4. Expert assessment of the combination of opportunities and threats to the strengths and weaknesses of the airline's activities.

Table 4
OTSW analysis of an airline’s activities with rating assessments

Expansion of the route network		Opportunities (O)				Threats (T)		
		Expansion of the route network	Implementation of new technologies	Improving additional services	Expanding cooperation with other airlines	Increased competition with other airlines	Unstable economic situation	Increase in fuel costs
Strengths (S)	Wide network of routes	(5;4;5)	(3;5;4)	(3;2;3)	(5;3;4)	(5;4;5)	(3;4;4)	(2;3;4)
	Competitive prices	(4;4;5)	(2;5;4)	(3;2;3)	(4;3;4)	(5;4;5)	(3;4;4)	(4;3;4)
	Passenger safety	(2;4;5)	(1;5;4)	(1;2;3)	(3;3;4)	(3;4;5)	(2;4;4)	(1;3;4)
Weaknesses (W)	Small market share	(4;4;5)	(2;5;4)	(2;2;3)	(4;3;4)	(5;4;5)	(3;4;4)	(2;3;4)
	Lack of loyalty program for passengers	(3;4;5)	(4;5;4)	(1;2;3)	(3;3;4)	(4;4;5)	(1;4;4)	(1;3;4)
	Outdated tariff groups of the company	(5;4;5)	(2;5;4)	(3;2;3)	(2;3;4)	(5;4;5)	(1;4;4)	(4;3;4)

Source: developed by the author based on experimental, simulated and open-source data.



OTSW factor matrix

	Strengths (S)	Weaknesses (W)
Opportunities (O)	Maxi/Maxi strategies	Mini/Maxi strategies
Threats (T)	Maxi/ Mini strategies	Mini/Mini strategies

Analysis of the external environment shows that airlines are in a highly competitive environment, where they must constantly adapt to new economic, political, social and technological factors. To assess the market situation, an analysis of threats (competitive forces) is carried out by dividing them into separate components (determining factors). Then, based on expert assessments, the significance of each element of the decomposition is determined by establishing weighting factors (Table 1).

The resulting assessment Y_i of expert opinions for ranking i -threats is determined by the expression:

$$Y_i = \sum W_{ij} \cdot X_{ij} \quad (1)$$

where W_{ij} are weight coefficients of j^{th} elements of decomposition of i^{th} threats;

X_{ij} are assessments of j^{th} elements of decomposition of i^{th} threats;

Next, a quantitative assessment of threats to the analysed airline and its direct competitors is carried out. The Table 2 shows an example of a quantitative assessment relative to the simulated conditions and environment.

The results of the competitive forces assessments for such a simulated situation are shown in the diagram (Pic. 3).

OTSW analysis is a method of strategic planning, which is a modification of SWOT analysis, and includes an analysis of factors of internal and external environment. This analysis is based on the development of the OTSW matrix (Table 3), which allows comparing external opportunities and threats with internal strengths and weaknesses, which were selected based on the resulting expert assessments.

The next stage involves an analysis of the correspondence between the opportunities and threats and the strengths and weaknesses of the airline's activity (Pic. 4).

The results of the OTSW analysis of a conditional simulated example of rating assessment of an airline are shown in Table 4.

Based on the obtained OTSW matrix of factors, it is possible to form four well-known groups of alternative strategies while prioritising

the Maxi/Maxi strategy. The development of those strategies results from a combination of opportunities and strengths (Table 5).

Therefore, based on the results of the analysis, it can be concluded that an airline, the environment of activity of which has been simulated during an experiment, has enough of both opportunities and faces potential threats, imposed by a set of economic, political, social and technological factors. In a considered example, preferable is variant of strategic designing of a company aimed at implementing existing opportunities and accumulated potential (Maxi/Maxi), which involves the implementation of series of strategic directions. Among them, the main opportunity is associated with expanding the airline's route network. Further developing the route network will strengthen the company's position in the air transportation market and ensure an influx of passenger traffic. However, the implementation of this opportunity is threatened by the company's weakness – increased internal competition, which can greatly affect its activities. However, such strengths as a wide route network and competitive prices will help to counter this threat, due to which the airline can compete with other airlines on the routes and maintain demand for air transportation. Passengers will continue to choose the airline brand due to market prices for tickets and the ability to choose where to fly. An important direction of the Maxi/Maxi strategy is the development and implementation of a cost reduction program. Overall, to fully take advantage of opportunities and counter threats, airlines should concentrate their efforts on solving the problems identified during the above-described analysis.

CONCLUSION

Strategic planning enables airlines to anticipate potential risks and opportunities and develop flexible and adaptive approaches to business management.

Under the conditions of uncertainty such as pandemics, climate change and conflicts, airlines are forced to quickly adapt to them and innovate.

This may include implementing new technologies, improving passenger service, and finding new markets and partnerships. Strategic thinking and proactivity are becoming key success factors, allowing airlines not only to survive but also to grow in the face of constant change. To devise an effective airline development strategy, it is necessary to conduct a deep analysis of the internal and external factors affecting the business. Internal factors include the company's structure, its financial condition, technological capabilities and human resources. At the same time, external factors such as changes in legislation, fluctuations in fuel prices, demand for air travel and the competitive environment also play an important role.

Thus, the approach to strategising on the activities of airlines based on internal and external factors analysis summary (IFAS/EFAS) and OTSW analysis allows revealing new threats and consider in the main airline development strategy (Maxi/Maxi) the effective use of existing opportunities and accumulated potential.

The practical significance of the study of the possibility of introducing OTSW analysis in devising airline strategy is determined by the relevance of air transportation development within the framework of achieving national goals, implementing national projects providing for further creating efficient transport system.

REFERENCES

1. Dontsova, O. I., Volokhov, A. V., Morkovkin, D. E. Prospects of world aviation development (on the example of Aeroflot and Lufthansa). *Journal of International Economic Affairs*, 2020, Vol. 10, Iss. 2, pp. 363–380. DOI: 10.18334/eo.10.2.110109.
2. Karikhmanova, D. G., Sokolov, M. A. The main trends in the development of the air transport industry in the context of sanctions. *Economy and Entrepreneurship*, 2022, Iss. 8 (145), pp. 227–230. DOI: 10.34925/EIP.2022.145.8.043.
3. Brutyan, M. M. Prospects for the Development of the Indian Civil Aviation Market [*Perspektivy razvitiya rynka grazhdanskoi aviatsii Indii*]. *RISK: Resources, Information, Supply, Competition*, 2018, Iss. 1, pp. 62–68. EDN: YWWPRZ.
4. Berezhnoy, A. V. Assessment of the competitiveness of a regional seaport: methodology and implementation

practice [*Otsenka konkurentosposobnosti morskogo porta regiona: metodologiya i praktika realizatsii*]. *Economy. Management. Law*, 2014, Iss. 3 (51), pp. 37–42. EDN: TKBQBR.

5. Golubinsky, V. V. Features of the formation of the strategy for the development of railway transport in the Russian Federation [*Osobennosti formirovaniya strategii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta v Rossiiskoi Federatsii*]. *Economy and Society*, 2020, Iss. 1 (68), pp. 1078–1080. EDN: TFZQOR [Access limited for subscribers].

6. Kozin, E. G., Spirkin, A. V., Subbotin, Yu. Saint Petersburg Metro: Strategizing Methodology in Practice. *Strategizing: theory and practice*, 2022, Vol. 2, Iss. 2 (4), pp. 163–173. DOI: 10.21603/2782-2435-2022-2-2-163-173.

7. Matveeva, L. G. Macroeconomic and regional determinants of water management development strategy [*Makroekonomicheskie i regionalnie determinanty strategirovaniya razvitiya vodnogo khozyaistva*]. *Bulletin of the Academy of Knowledge*, 2023, Iss. 4 (57), pp. 184–187. EDN: BJWCDZ

8. Korolev, A. V. Approaches to the development of a strategy for the effective functioning and development of passenger transport in the context of integration transformations [*Podkhody k razrabotke strategii effektivnogo funktsionirovaniya i razvitiya transporta v usloviyakh integratsionnykh preobrazovaniy*]. *Economics, modelling, forecasting [Collection of works of Research economical institute of the Ministry of Economy of the Republic of Belarus]*, 2015, Iss. 9, pp. 65–71. EDN: NSGPOB.

9. Nesterov, Yu. V., Fraiman, A. B. Paradigm of air transport management strategy [*Paradigma strategii upravleniya vozdushnym transportom*]. *Transport Rossiiskoi Federatsii*, 2014, Iss. 2 (51), pp. 24–29. EDN: SDEJAP.

10. Kvint, V. L. Strategy development: monitoring and forecasting the internal and external environment [*Razrabotka strategii: monitoring i prognozirovaniye vnutrennei i vneshnei sredy*]. *Management consulting*, 2015, Iss. 7 (79), pp. 6–11. EDN: UBHJLL.

11. Kvint, V. L. *Konzepte der Strategie: Impulse für Führungskräfte*. München. UVK Verlag, 2021, 128 p. ISBN 978-3-7398-3105-3.

12. Kvint, V. L. *Strategy for the Global Market: Theory and Practical applications*. New York, Routledge Taylor and Francis Group, 2016, 548 p. ISBN: 9781138892125.

13. Kvint, V. L., Bodrunov S. D. *Strategizing Societal Transformation. Knowledge, Technologies, and Noonomy*. USA (Palm Bay), Canada (Burlington), United Kingdom (Abingdon). Apple Academic Press, 2023, 228 p. ISBN 978-1-77491-422-9.

14. Zakharova, I. V. Analysis of development factors of the regional aviation cluster [*Analiz faktorov razvitiya regionalnogo aviatsionnogo klastera*]. *Bulletin of Moscow Aviation Institute*, 2017, Vol. 24, Iss. 1, pp. 192–200. EDN: YGSCBX.

15. Ramenskaya, S. E., Fisun, Yu. V. Selecting a development strategy for an aviation company [*Vybor strategii razvitiya aviatsionnoi kompanii*]. *Bulletin of Belarusian State Economic University*, 2018, Iss. 1 (126), pp. 122–130. EDN: YPJEEI.

Information about the author:

Sushko, Olga P., Ph.D. (Economics), Associate Professor at the Department of Air Transport Economics and Management, Moscow State Technical University of Civil Aviation; Associate Professor at the Department of National and Regional Economics of Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russia, osushko@mail.ru.

Article received 24.01.2024, approved 06.08.2024, accepted 10.09.2024.





Modelling the Assessment of the Potential Changes in Air Transportation Rates Based on Cost Components



Ilya V. URYUPIN



Andrey O. VLASENKO

Ilya V. Uryupin¹, Andrey O. Vlasenko²

¹ Federal Research Centre «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

² Inter-Industry Analytical Centre (IAC Ltd.), Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0001-7258-754X; Web of Science Researcher ID: AIB-5096-2022; Scopus Author ID: 57210445072; Russian Science Citation Index SPIN-code: 9065-8749; Russian Science Citation Index Author ID: 1137480.

² ORCID 0000-0002-1286-8857; Russian Science Citation Index SPIN-code: 8362-4584; Russian Science Citation Index Author ID: 893078

✉ ¹ uryupin93@yandex.ru.

ABSTRACT

The price of transportation (rate) is one of the key factors in the development of the air transportation system (ATS) of any country, in particular of the Russian Federation. In turn, the formation of the rate directly depends on the cost price of transportation and its components. Forecasting and modelling the cost prices considering the influence of external factors allows us to obtain an assessment of the potential of changing the rate, which can be used as an indicator of the direction of ATS development and adjustments to improve its efficiency.

The objective of the study is to develop a model for assessment of the potential of changes in air transportation rates in the Russian Federation in the 2030–2040 period for the fleet of foreign-made mainline aircraft. The assessment of the potential for rate changes

is based on changes in the most significant external components of the cost price of transportation, such as fuel cost, annual flight time, cost of maintenance and repair. The choice of components is due to their greatest exposure to the influence of long-term factors.

Using mathematical modelling and economic and mathematical methods, based on statistical and forecast data, the model has been tested for an assessment of the potential change in the value and structure of direct operating costs of mainline aircraft regarding aggregated expense items. Using scenario assumptions, intervals of variation of factors affecting cost price were determined. The result of modelling the potential for change in cost and rates is demonstrated for two groups of mainline commercial aircraft: narrow-body and wide-body.

Keywords: air transportation, cost price, rate, operating costs, mathematical modelling.

For citation: Uryupin, I. V., Vlasenko, A. O. Modelling the Assessment of the Potential Changes in Air Transportation Rates Based on Cost Components. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 218–226. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-12>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

Price (rate) is a key factor influencing demand for air travel. At the same time, the rate is directly related to the cost price of air travel, i.e. it depends on the direct and indirect costs required to perform flights and operate the company. The main expense items that form the airfare include servicing passengers, baggage and aircraft at the airport, costs of aviation fuel, aircraft maintenance and repair, insurance and leasing, payroll, advertising and administrative costs, commissions and fees, air navigation and meteorological support, and aircraft depreciation [1–4].

At the same time, the airfare is also affected by the degree of competition and changes in the solvent demand of the population. Thus, on lines with many carriers, air tickets can often be sold below cost price to maintain the company's position in the market. The commercial policy of the company also has a significant impact on the airfare. In this case, the significant impact is provided by periods of flight operations (seasonality) [5] during which airlines vary a schedule and set different rate levels. At the same time, airlines often use the principle of price discrimination of passengers [6], when consumers can pay different fares for the same air travel since airlines, as a rule, have many rates for each destination, which differ in terms and conditions of booking. The main «limitations» include [7] early booking (minimum time before departure, calculated in days), spending Saturday evening at the destination, accrual of miles (bonuses) to frequent flyers, the possibility of returning/exchanging a ticket, the airline's schedule.

The airfare can also be affected by the consumer's appurtenance to a certain social group, e.g. special rates for youth, children, students, retirees. Some of these social groups are included in air travel subsidy programs¹.

However, it should be noted that most of the above factors are elements of the airline's operations management (revenue operations management) [8; 9] and are practically not related to the fleet in operation. Therefore, the only factor that has a significant impact on the rate level in the long term and is related to fleet is the cost price of air transportation. It is its change that largely determines the potential volume of air transportation [3; 10], revenue and profit of the

company.

Currently, several problems can be identified in the field of operation and maintenance of aircraft [11], which in turn can potentially have a significant impact on the structure and amount of operating costs and, therefore, can entail an increase in the level of air transportation rates. Thus, the *purpose* of determining the potential rate changes is relevant for planning the airlines strategy and forecasting the demand for air transportation and development of the air transportation system (ATS) as a whole.

To determine the potential change in air transportation rates, the study using *mathematical modelling* [1; 12–14] and *statistical and forecast input data*, available at open sources at the moment of the research, developed an assessment model of the change in the value and structure of aircraft direct operating costs (DOC), including the following consolidated items: aviation fuel and lubricants, maintenance and repair, flight and cabin crew wages, airport costs, ownership. Among the most significant external conditions affecting the assessment of the cost of transportation under the influence of long-term factors, three are highlighted: cost of fuel and of maintenance and repair as well as annual flight time.

A scenario analysis of the change and sensitivity of the structure and total value of the cost price of air transportation was carried out for the identified factors. To test the application of the model for each of the factors, scenario variation intervals were considered. Based on the results of the change in the cost price and its components, obtained during testing, the scenario intervals of rate change were considered in the long term for 2030–2040. The result of the assessment of the potential rate changes is presented for mainline aircraft of foreign manufacture.

RESULTS

Determination of variation intervals of factors, influencing cost price

The cost and type of fuel are key conditions for determining the fuel efficiency requirements of advanced engines. Since the cost of aviation fuel has historically been strongly correlated with the oil prices², it can be expected that the average cost of fuel for the period 2030–2040 will change

¹ Resolution of the Government of the Russian Federation dated 02.03.2018, № 215. [Electronic resource]: <http://static.government.ru/media/files/oY69DJH21BsDYTYg9wGksgA7AbEN8AVi.pdf>. Last accessed 29.01.2024.

² Jet Fuel Price Monitor. [Electronic resource]: <https://www.iata.org/en/publications/economics/fuel-monitor/>. Last accessed 29.01.2024.



significantly under the influence of changes in the oil prices. At the same time, an additional impact will be exerted by the expansion of the use of synthetic aviation fuel and the introduction of various types of fees for extra greenhouse emissions into the atmosphere – the so-called «carbon tax» [15–17].

To assess the cost of jet fuel (aviation kerosene), the values of 85–105 US dollars per barrel, were used as forecast values for the cost of oil in 2030–2040, those values are also present as assumptions in the FAA³ and EU⁴ forecast. At this oil price, the cost of jet fuel will be from 730 to 930 US dollars per ton.

With the overall tightening of environmental requirements in the period 2030–2050, conventional and hybrid engines may largely switch to the use of bio- or synthetic fuel, SAF (Sustainable Aviation Fuel). The transition to SAF may significantly increase the actual cost of fuel relative to the projected oil price. Considering the forecasted increase in the share of such fuel in the total volume of aviation fuel by the International Energy Agency from 10 % in 2030 to 19 % in 2040, the real cost of aviation fuel can amount to from 864 US dollars per ton to 1020 US dollars per ton⁵.

The spread of the practices of introducing a carbon tax may also result in the future in an additional increase in the cost of fossil fuel. As an assumption for calculating the increase in the cost of jet fuel, the carbon tax value can be taken as 50 US dollars per ton of CO₂e in 2030 and 200 US dollars per ton of CO₂e in 2040⁶, which, when converted to a ton of jet fuel burned, would correspond to a cost of 157 US dollars to 630 US dollars per a ton. In this case, the cost of a mixture of fossil and synthetic fuels in 2035 would be 1100–1500 US dollars for a ton.

³ FAA Aerospace Forecast Fiscal Years 2023–2043. [Electronic resource]: <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2023-FAA%20Aerospace%20Forecasts.pdf>. Last accessed 29.01.2024.

⁴ Hydrogen-powered aviation. A fact-based study of hydrogen technology, economics, and climate impact by 2050. [Electronic resource]: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/55fe3eb1-cc8a-11ea-adf7-01aa75ed71a1>. Last accessed 29.01.2024.

⁵ Aviation fuel consumption in the Sustainable Development Scenario, 2025–2040. [Electronic resource]: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/aviation-fuel-consumption-in-the-sustainable-development-scenario-2025-2040>. Last accessed 29.01.2024.

⁶ Hydrogen Insight 2021. [Electronic resource]: <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf>. Last accessed 29.01.2024.

In Russia, the prospects for introducing a carbon tax and biofuel production are currently unclear. At the same time, a complete rejection of fossil fuels seems unlikely. The average cost of fuel in Russia generally reflects the dynamics of world prices but is less susceptible to fluctuations. The most realistic range of average cost of aviation fuel for the conditions of the Russian Federation in terms of traditional engines in 2030–2040 seems to be from 730 US dollars to 1100 US dollars per ton. Since the price of aviation fuel on the world market has recently demonstrated high volatility, the value of 1500 US dollars per ton was additionally considered. The base value of the cost of aviation fuel is taken as 850 US dollars per ton⁷ (in 2021 prices).

Maintenance and repair costs are an important component of the cost price. Since most modern aircraft analysed in the study use many foreign-made components and technologies, assumptions in forming the scenarios comprise an increase in expenses under this item, including due to exchange rate changes in cost, complication and increased cost of spare parts delivery logistics. Since it is currently impossible to predict the exact balanced value of the relative change in the cost of maintenance and repair, the coefficients of change in the cost of maintenance and repair per flight hour were taken as scenario assumptions for model calculations equal to 1 (without increase in the cost), 1,3 (slight increase in the cost) and 1,7 (high increase in the cost).

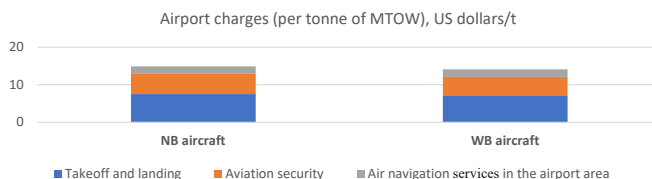
The annual flight time is closely related to the possibility of carrying out maintenance and repair and has a direct impact on the volume of operations performed per year. A decrease in the indicator of maintenance and repair leads to a proportional decrease in the annual volume of operations and, accordingly, to the same increase in the specific cost of ownership of an aircraft.

When carrying out model calculations, the annual flight time relatively characteristic of different aircraft was assumed for three scenarios at the level of 1 (flight time is the same), 0,85 (slight decrease in flight time), 0,7 (high decrease in flight time).

Flight and cabin crew labour costs for the calculations were fixed at current levels typical for aircraft classes.

Airport charges were estimated for aircraft classes by obtaining weighted average airport

⁷ Federal Air Transport Agency. [Electronic resource]: <https://favl.gov.ru/dejatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-ceny-na-aviagsm/>. Last accessed 05.03.2022.



Pic. 1. Airport charges [performed by the authors].

charges based on the volume of operations for aircraft of different classes at airports within the air transport system of the Russian Federation (Pic. 1). The charges were assumed at approximately 15 US dollars for narrow-body (NB) aircraft and approximately 14 US dollars for wide-body (WB) aircraft per ton of maximum take-off weight (MTOW).

Based on the data on the flight performance characteristics (FPC), the levels of direct operating costs were estimated for modern foreign-made aircraft for which data on the technical features is available.

Since the seat layout and nature of the use of aircraft may differ significantly from company to company, the following assumptions were made for comparability of the results of estimation of the level of specific costs: (1) for all aircraft within the same class, the same value of average flight time corresponding to the aircraft class was assumed; (2) for all aircraft, for calculations single-class cabin layouts with the same seat pitch were assumed.

The scenario cost estimates were grouped for two classes of commercial mainline aircraft under consideration: narrow-body aircraft, wide-body aircraft.

To determine potential changes in the cost of transportation, calculations were performed based on the basic scenario values of counting of the change intervals for the three factors under consideration: (1) fuel cost – 850 US dollars; (2) – change in the cost of maintenance and repair – 0 %; (3) decrease in flight hours – 0 %. Since these factors separately affect independent cost items, their impact can be considered separately.

To determine the cost, based on open data^{8,9} on the transportation of passengers and goods, the average journey distances were estimated for the aircraft classes under consideration.

Estimation of direct operating costs regarding mainline aircraft

Estimation of direct operating costs (DOC) were obtained using mathematical modelling and economic-mathematical methods, based on available statistical data and dependencies [1; 14]. These calculations are largely conditional in nature, are not related to the operational performance of individual companies, do not consider changes that have occurred in the period since the preparation of the research materials, and are used exclusively to test the proposed calculation model within the framework of the specified scenarios.

Mainline narrow-body aircraft

Pic. 2 shows diagrams of specific DOC regarding NB aircraft calculated per seat-kilometre and per ton-kilometre depending on the flight distance. Optimal specific costs for passenger transportation are achieved within the ranges of 1900–7000 km and amount, depending on the aircraft, to 3,5 to 4,5 US cents per seat-kilometre. The range of optimal distances for cargo transportation are shifted to the left and are within the range of 1000–6500 km. The cost of transportation depending on the aircraft model is 0,3–0,4 US dollars per ton-kilometre.

Specific direct costs on medium distances (Pic. 3) for passenger transportation average about 4,6 US cents per seat-kilometre, and for cargo transportation – 34,3 US cents per ton-kilometre.

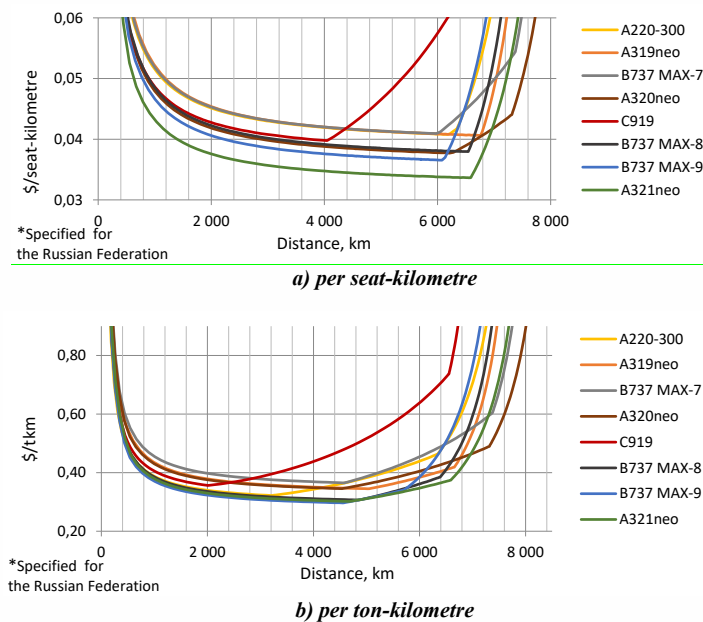
Mainline wide-body aircraft

Pic. 4 shows the specific DOC of WB aircraft per seat-kilometre and per ton-kilometre depending on the flight distance. Optimal specific costs for passenger transportation are achieved within distances of 4000–14000 km and, depending on the aircraft, range from 3,1 to 4 US cents per seat-kilometre. The range of optimal distances for cargo transportation is shifted to the left and is within 2000–13000 km. WB aircraft have a minimum cost of transportation per ton-

⁸ FlightRadar24 [Electronic resource] <https://www.flightradar24.com/> Last accessed 29.01.2024.

⁹ Federal State Statistics Service [Electronic resource] <https://fedstat.ru/> Last accessed 29.01.2024.





Pic. 2. Specific direct operating costs of NB aircraft as calculated per a) seat-kilometre and b) ton-kilometre [calculated by the authors].

kilometre, which, depending on the aircraft model, is 22–30 US cents per ton-kilometre.

Specific direct costs for medium distances (Pic. 5) average about 3,9 US cents per kilometre for passenger transportation and 26,2 US cents per ton-kilometre for cargo transportation.

Variation of cost factors

Based on the cost structure obtained for each class of aircraft, the change in the total cost was estimated when varying within the above-assumed ranges of three factors relative to the basic value. For building a model the following values were considered as the scenario examples:

- Fuel cost of 730, 1100 and 1500 US dollars per ton (–14 %, +29 % and +76 % relative to the basic value under the conditions of high volatility).

- Increase in the cost of maintenance and repair by 30 % and 70 %.

- Decrease in flight hours by 15 % and 30 %.

Pic. 6 shows the results of modelling the change in direct operating costs of passenger and cargo transportation depending on the changes in factors for NB aircraft and WB aircraft. The results show that the values of the average change in tariff for a given change in the factor for cargo and passenger transportation are very close. At the same time, with an increase in the average range of aircraft use, an increase in the influence of the fuel component on the level of costs is observed.

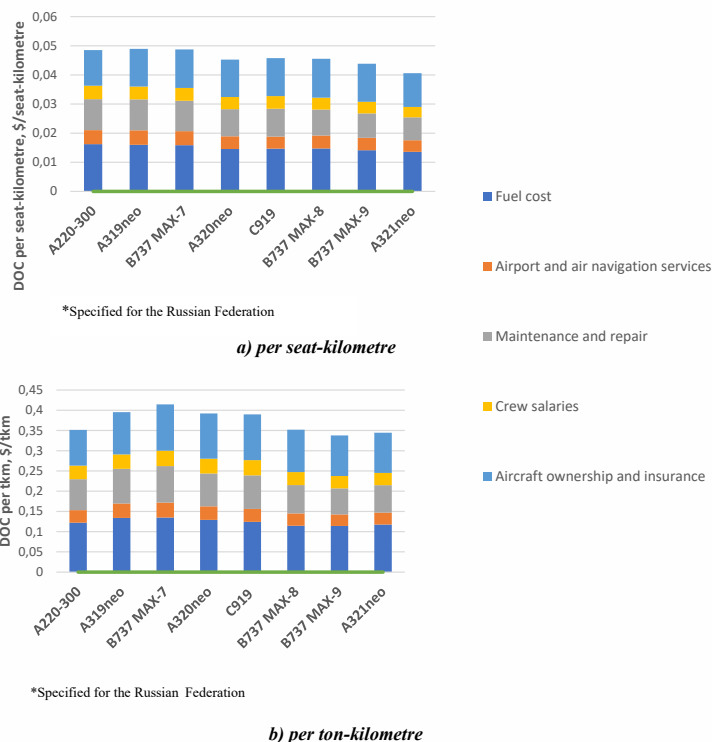
Rate change assessment

If we proceed from the rather low level of operating profit margin of air transportation (for example, the operating profit margin of passenger air transportation in Russia, according to National Credit Ratings LLC estimate was at that time of 1–4 %¹⁰), it need scarcely be said about the accelerated growth of the rate compared to the cost. Assuming that the level of profitability will be around zero, the change in the rate will occur synchronously with the change in the full cost price.

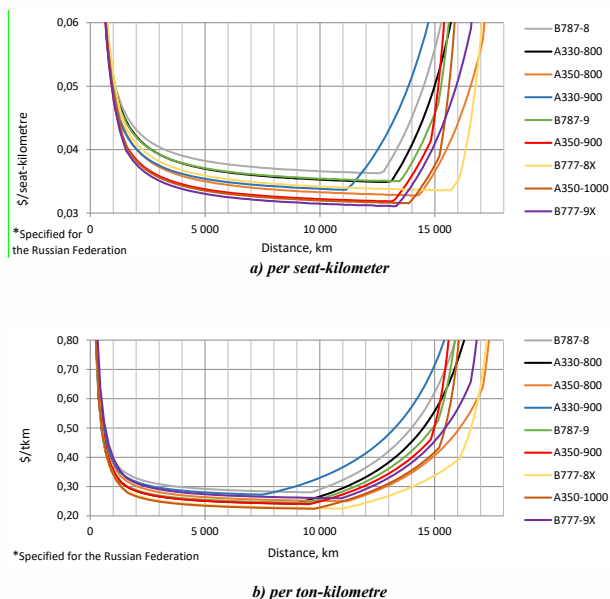
To shift from direct operating costs to full cost price, it is necessary to take into account other expenses that are not included in DOC. Authors' analysis of the structure and dynamics of expenses shows that their value for both passenger and cargo transportation in constant prices has changed very little since 2013 and is estimated at about 0,9 US cents per seat-kilometre and about 8,7 US cents per ton-kilometre (Pic. 7).

Considering the addition not included in DOC, the relative change in the rate is estimated (Pic. 8). The largest increase in the rate for NB aircraft and WB aircraft will be at extremely high fuel prices. At the same time, WB aircraft demonstrate a greater increase in the rate with an increase in fuel prices.

¹⁰ Baymukhametova. L. Transport: where the margin lies? National Credit Rankings LLC, 6.12.2021, P. 10. [Electronic resource]: https://ratings.ru/files/research/corps/Transport_margin_Dec2021.pdf. Last accessed 29.01.2024.



Pic. 3. Distribution of specific direct operating costs by NB aircraft expense items calculated per a) seat-kilometre, b) ton-kilometre [calculated by the authors].

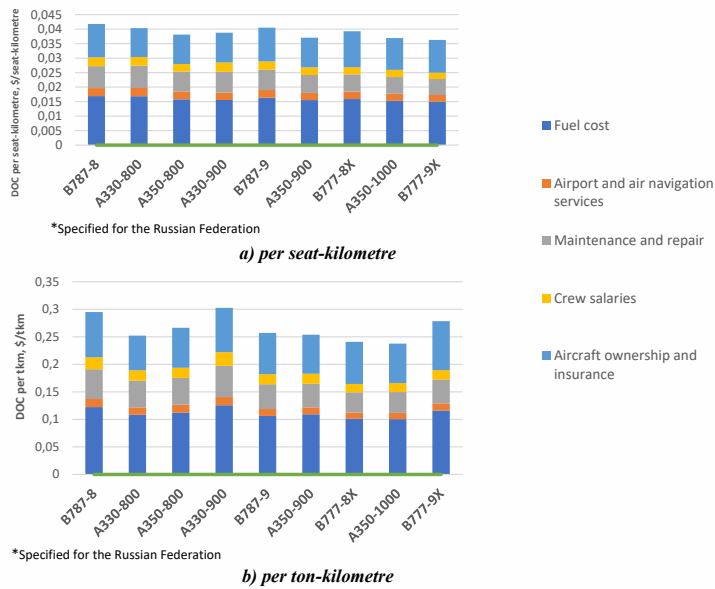


Pic. 4. Specific direct operating costs of WB aircraft calculated per a) seat-kilometre and b) ton-kilometre [calculated by the authors].

The analysis of rate sensitivity to the factors affecting the cost price showed that the rate elasticity relative to the increase in the cost of aviation fuel is from 0,26 (NB aircraft) to 0,31 (WB aircraft), relative to the increase

in the cost of maintenance and repair elasticity is from 0,13 (WB aircraft) to 0,16 (NB aircraft), relative to the decrease in flight hours it is from 0,27 (WB aircraft) to 0,29 (NB aircraft). In general, it can be noted that with an increase





Pic. 5. Distribution of specific direct operating costs of WB aircraft by cost items calculated per a) seat-kilometre, b) ton-kilometre [calculated by the authors].



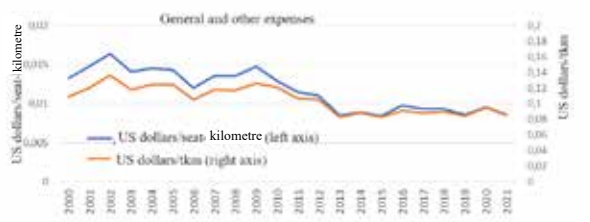
Pic. 6. Change in direct operating costs with varying factors [performed by the authors].

in the average transportation distance, the role of the fuel component increases. The greatest sensitivity of the transportation rate for NB aircraft is observed to a decrease in flight hours, for WB aircraft – to the cost of fuel.

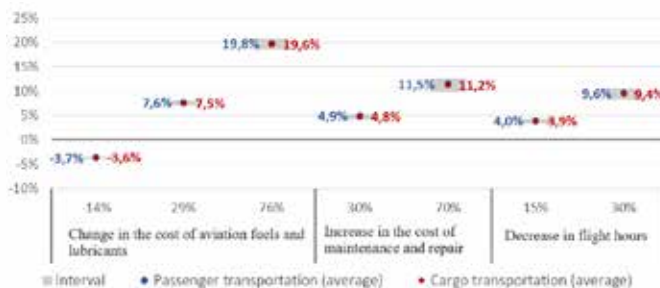
Modelling shows (Pic. 9) that with the combination of high values of scenario factors (scenario 1: fuel cost of 1100 US dollars per ton, increase in maintenance and repair costs

by 70 % and a decrease in flight hours by 30 %) the rate increase for NB aircraft will be about 30 %, for WB aircraft – 29 %.

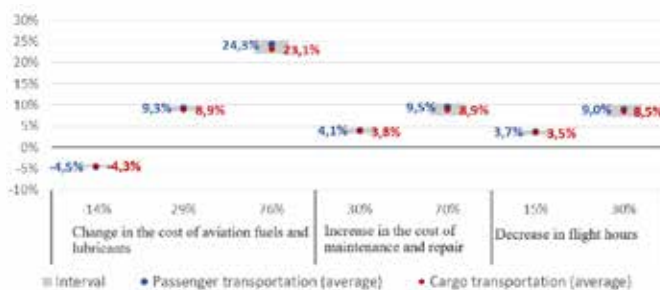
If extreme fuel prices are set (1500 US dollars per ton) together with a 70 % increase in maintenance and repair costs and a 30 % decrease in flight hours (scenario 2), then the rate increase will be 43 % for NB aircraft and 45 % for WB aircraft.



Pic. 7. Dynamics of specific costs not included in DOC [performed by the authors].



a) NB aircraft



b) WB aircraft

Pic. 8. Rate change depending on factors influencing cost price change [performed by the authors].

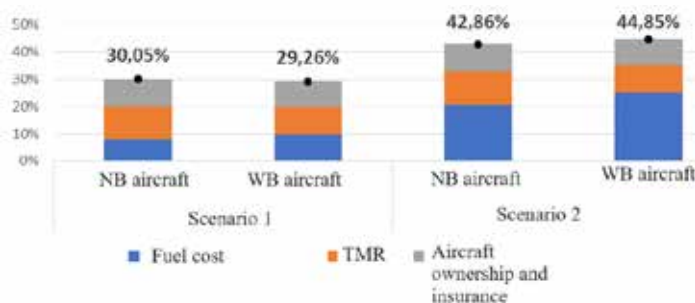


Рис. 9. Структура увеличения тарифа на перевозки в двух сценариях [выполнено авторами].

BRIEF CONCLUSIONS

The work, based on evaluations of the increments of the components of the cost price of transportation, has presented the model and, based on proposed scenarios, estimates of the average value and structure of direct operating costs for passenger and cargo transportation within the air transport

system of the Russian Federation corresponding to the average weighted flight distance of narrow- and wide-body mainline aircraft. With one of scenario assumptions of the increase in the cost of fuel from 850 to 1100 US dollars/t, in the cost of maintenance and repair by 70 % and a decrease in flight time by 30 % of the basic level, it was found



that the increase in direct operating costs will be about 36 %; for NB aircraft, 10 % of that increase will be induced by aviation fuel and lubricants costs, 14 % by maintenance and repair costs and 12 % by reduced flight time, and for WB aircraft 12 % will be induced by aviation fuel and lubricants costs, 12 % by maintenance and repair costs and 12 % by reduced flight time.

Considering the evaluation of factors of changes in the cost of transportation and if a near-zero values of air transportation operating profit margin is assumed for the Russian air transport system, the calculations resulted in estimates of changes in the transportation rates.

The model tested during the study and the approaches to assessing changes in air transportation rates obtained during the study of the model can be used in the future to forecast potential demand for air transportation of passengers and cargo based on the input of up-to-date real data and considering changing parameters of external factors.

REFERENCES

1. Fioriti, M., Vercella, V., Viola, N. Cost-estimating model for aircraft maintenance. *Journal of Aircraft*, 2018, Vol. 55, Iss. 4, pp. 1564–1575. DOI: 10.2514/1.C034664.
2. Korodyuk, I. S., Grinev, D. M. Methodological features of determining the cost of services of regular passenger air carriers for various types of commercial loading [Metodicheskie osobennosti opredeleniya sebestoimosti uslug regul'yarnykh passazhirskikh aviaperevozchikov dlya razlichnykh vidov kommercheskoi zagruzk]. *Transportnoe delo Rossii*, 2019, Iss. 1, pp. 147–150. EDN: XZDTQL.
3. Fridlyand, A. A., Kuzmin, A. V. Analysis of the dynamics of cost and rates in the Russian air transport market [Analiz dinamiki sebestoimosti i tarifov na aviatransportnom rynke Rossii]. *Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*, 2019, Iss. 27, pp. 75–85. EDN: GESVLP.
4. Fridlyand, A. A., Kuzmin, A. V. Analysis of trends and dynamics of pricing on the largest domestic airlines in Russia [Analiz tendentsii i dinamiki tsenoobrazovaniya na krupneishikh vnutrennikh vozdukhnykh liniyakh Rossii]. *Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*, 2017, Iss. 18 (329), pp. 84–94. EDN: ZIOWZF.
5. Sushko, O. P., Koryagin, N. D. Modelling of Passenger Air Transportation Prices. *World of Transport and Transportation*, 2022, Vol. 20, Iss. 5 (102), pp. 54–63. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-5-7.
6. Vasigh, B., Fleming, K., Tacker, T. Introduction to Air Transport Economics: From Theory to Applications. Aldershot, Hampshire: Ashgate Publishing Limited, 2008, 388 p. ISBN 9780754670797.
7. Abdelghany, A., Abdelghany, Kh. Modelling Applications in the Airline Industry. London, Routledge, 2010, 296 p. ISBN 978-0-7546-7874-8. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315595818> [access for subscribers].
8. Komaristyk, E. N. Forecasting the financial results of airlines in the passenger air transportation market [Prognozirovaniye finansovykh rezultatov deyatel'nosti aviakompanii na rynke passazhirskikh aviaperevozok]. *Marketing uslug*, 2014, Iss. 1, pp. 77–81. EDN: HUWVOF.
9. Tkachenko, T. V. Modern trends and directions of development of the passenger air transportation market [Sovremennye tendentsii i napravleniya razvitiya rynka passazhirskikh aviaperevozok]. *Transportnoe delo Rossii*, 2021, Iss. 4, pp. 35–37. DOI: 10.52375/20728689_2021_4_35.
10. Shafar, I. V. Formation of prices for air tickets [Formirovaniye tseny na aviabilitye]. *Current problems and prospects for economic development: Russian and foreign experience*, 2023, Iss. 3 (45), pp. 33–42. EDN: FJAVKA.
11. Chaika, N. K. Approaches to assessing the economic efficiency of an aircraft in the context of import substitution [Podkhody k otsenke ekonomicheskoi effektivnosti vozduhnogo sudna v usloviyakh importozameshcheniya], *STIN*, 2023, Iss. 6, pp. 74–78. EDN: KWPGYB.
12. Klochkov, V. V., Rusanova, A. L., Maksimovskiy, V. I. Economic and mathematical modelling of processes of mastering serial production of new civil aircraft [Ekonomiko-matematicheskoe modelirovaniye protsessov osvoeniya seriynogo proizvodstva novykh grazhdanskikh samoletov]. *Bulletin of the Moscow Aviation Institute*, 2010, Vol. 17, Iss. 3, pp. 235–245. EDN: MTYNGF.
13. Richmond, S. B. Forecasting Air Passenger Traffic by Multiple Regression Analysis. *Journal of Air Law and Commerce*, 1955, Vol. 22, Iss. 4, pp. 434–444. [Electronic resource]: <https://scholar.smu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2955&context=jalc>. Last accessed 24.01.2024.
14. Washington, S., Karlaftis, M. G., Mannering, F., Anastasopoulos, P. Statistical and Econometric Methods for Transportation Data Analysis. 3rd ed. Chapman and Hall/CRC. New York, 2020, 496 p. DOI: 10.1201/9780429244018 [access for subscribers].
15. Klochkov, V. V., Okhapkin, A. A. International regulation of environmental protection from the aviation effects and new challenges to the economic security of Russia. *Economic security*, 2021, Iss. 4, pp. 1329–1346. DOI: 10.18334/ecsec.4.4.113245.
16. Okhapkin, A. A. Estimated loss to the Russian aviation industry due to the implementation of the Carbon Offset and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). *Economic security*, 2022, Vol. 5, Iss. 4, pp. 1615–1632. DOI: 10.18334/ecsec.5.4.116288.
17. Dolbnya, M. S., Rakhmatullina, A. Sh., Zaitseva, I. V. The Impact of the «Carbon Offsetting and Reduction System for International Aviation» on the Formation of an Aviation Tariff. *Actual Problems of Social and Humanitarian Sciences and Intercultural Communication: Language, Culture, Education and Economics: Proceedings of the Third International Scientific and Practical Conference*, St. Petersburg, April 28–29, 2022, pp. 323–329. EDN: HQRBGH.

Information about the authors:

Uryupin, Ilya V., Ph.D. (Physics and Mathematics), Junior Researcher at the Federal Research Centre «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences (FRC CSC RAS), Moscow, Russia, uryupin93@yandex.ru.

Vlasenko, Andrey O., Senior Researcher of LLC Inter-Industry Analytical Centre (IAC Ltd.), Moscow, Russia, andrey.vlasenko84@gmail.com.

Article received 29.01.2024, approved 04.06.2024, accepted 09.06.2024.



Digital Technology in Air Cargo Transportation



Vasily E. Zhukov

Saint Petersburg State University of Civil Aviation (SPbGUGA), Saint Petersburg, Russia.

✉ vasizhukov@yandex.ru.

Vasily E. ZHUKOV

ABSTRACT

The development of modern air transport is inextricably linked with the progressive growth of air cargo transportation volumes. The aviation industry is one of the most knowledge-intensive and sophisticated sectors of the economy. Accordingly, the technological processes taking place in the industry are based on the achievements of science and the improvement of information support, which takes a digital form. End-to-end digital technologies have found wide application in the development of the country's civil aviation. The subject of the research in this article is the analysis of existing digital transformation technologies in organising the cargo transportation process. This process can be divided into the following stages: shipment booking and preparing relevant documents, cargo handling at the departure warehouse, delivery and loading on board an aircraft, transportation, unloading and delivery to the arrival warehouse, cargo handling at the arrival airport's warehouse, and cargo delivery to the consignee. Each of these stages has a discrete set of operations, which together turn

a discrete process into a continuous one. The main end-to-end digital technologies include big data; neurotechnology and artificial intelligence; distributed ledger systems; quantum technologies; new manufacturing technologies; industrial internet; robotics components and sensors; wireless communication technologies; virtual and augmented reality technologies.

The problem set in the study is to analyse the world and domestic experience of applying digital transformation, some of the listed digital technologies in organising air cargo transportation, as well as to consider cargo hubs and, consequently, integration of cargo transportation.

The solution to the problem involves the presence of constraints associated with the specifics of cargo transportation, since each mode of transport has its own characteristics associated with the processing of cargo flow, and organisation of the cargo yard activity of a railway station will differ from organisation of the cargo terminal of an airport.

Keywords: *air cargo transportation, digital transformation, technological processes, digital platforms.*

For citation: Zhukov, V. E. Digital Technology in Air Cargo Transportation. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss.4 (113), pp. 227–232. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-13>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.
Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

BACKGROUND

Dynamics of air cargo transportation

The importance of air cargo transportation increases with economic development. Air cargo transportation is an integral part of the global trading system [1]. The analysis of air cargo growth rates presented in the report of the International Air Transport Association (IATA) shows positive dynamics over the past three years. Global air cargo transportation demand, expressed in quantified tonne-kilometres (CTK, Cargo Tonne-Kilometres) in October 2023 amounted to 21,9 billion tkm. This is an increase of 3,8 % compared to the same period of the previous year. Despite this growth, the industry's performance remains slightly below the pre-pandemic level. The steady annual growth of CTK since August 2023 indicates the ongoing recovery of the global air cargo market and is a positive signal for ending the year with higher figures (Pic. 1¹).

The overall dynamics of growth in cargo tonne-kilometres, considering seasonal fluctuations, according to the IATA report, is presented in Pic. 2.

Approaches to studying the research problem

Cargo handling operations play an important role in air cargo transportation and can be divided into several groups:

- Processing an order for cargo shipment.
- Delivery of cargo to the airport (to the airport cargo terminal).
- Cargo handling at the terminal warehouse, a set of operations for categorising cargo, its weighing, marking, packing, bundling, assembling for the flight, cargo safety check.
- Registration of shipping documents.
- Collection of fees [2].

The discrete nature of the cargo handling process requires a clear and precise organisation of the process; therefore digital transformation processes are increasingly used to ensure the cargo transportation process.

Digital transformation is a process that involves the integration of digital technologies into various aspects of an organisation or industry, fundamentally changing the methods of doing business, optimising processes and creating value [3].

¹ IATA Air Cargo Market Analysis October 2023. [Electronic resource]: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-cargo-market-analysis-october-2023>. Last accessed 19.05.2024.

In the context of sustainable transport development, digital transformation involves the use of data-driven technologies and solutions to solve environmental, social and economic problems associated with transport systems [4].

By using digital platforms, real-time data collection and advanced analytics, transport organisations can optimise their operations by minimising congestion, reducing travel times and optimising routes [5].

These few key statements in scientific articles devoted to the issues of digital transformation in the transport sector highlight the importance of the need to study this issue.

RESULTS

Digitalisation of shipping documents

As already noted, transportation of goods begins with proceeding shipping documents. The air waybill (AWB) is the main document regulating the transportation process. AWB implements the following functions in accordance with the information it contains:

– Contract of carriage – an agreement between the shipper and the carrier, which specifies the terms of cargo transportation.

– Certificate of receipt of goods by the airline – once signed, this is legal evidence that the air carrier has received the goods for transportation (in case of any disputes).

– Shipment tracking – the AWB number is an important piece of information that allows you to track the cargo (it indicates also route details and airport codes).

– Contact information for all parties – contact details for all parties involved.

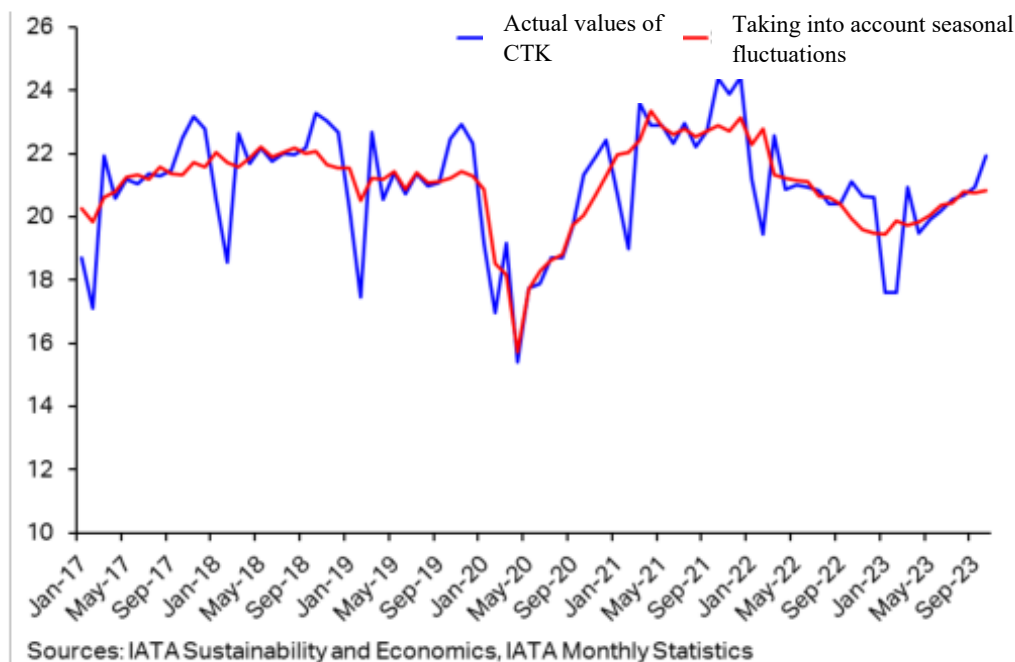
– AWB (shipment bill) – information on the costs associated with the shipment process, so the AWB can serve as an invoice along with supporting documents. It also supports the accounting process.

– Customs declaration – this is one of the main documents required by customs authorities to allow the transportation of goods.

– Commodity Description – details of the quantity, weight, dimensions, value and nature of the goods being transported.

– Handling and Delivery Guide – may include special instructions on how to handle the shipment, i.e. as for hazardous, fragile or temperature-sensitive goods.

– Insurance Certificate – evidence that the shipment is insured, containing details of the insurance coverage.



Pic. 1. Global CTK (billions of tkm per month)¹.

Every shipment requires a set of accompanying documents that need to be stored, distributed and tracked. In 2010, IATA (International Air Transport Association) introduced the e-air waybill (e-AWB), which became the default contract of carriage for all air cargo shipments from 1 January 2019. It is part of IATA's eFreight programme, which aims to digitise the industry and move it to a paperless format. It aims to improve efficiency, data quality, cost effectiveness and sustainability (eliminating over 7 800 tons of paper documents annually), among other benefits for the air cargo industry.

Today, in accordance with Resolution 672 on Multilateral Electronic Air Waybills², paper air waybills are no longer required. This means that they can still be used, but IATA and its members have largely switched to the electronic version, which is faster to process and exchange, easier to store and manage, and much more environmentally friendly. A detailed guide has been developed for

freight forwarders on how to integrate e-AWB³.

Digital platforms

The digital transformation of the air cargo process management is moving towards the creation of software for digital platforms.

For example, «Scope» from Riege Software is a complete freight forwarding platform for managing international sea and air transportation⁴. Air cargo transportation functionalities include automatic e-AWB creation, carrier AWB number administration, connection to cargo community systems for messaging, and much more.

Magaya's digital freight platform⁵ automates numerous supply chain workflows, including onboarding carriers via AWB and exchanging electronic AWB messages.

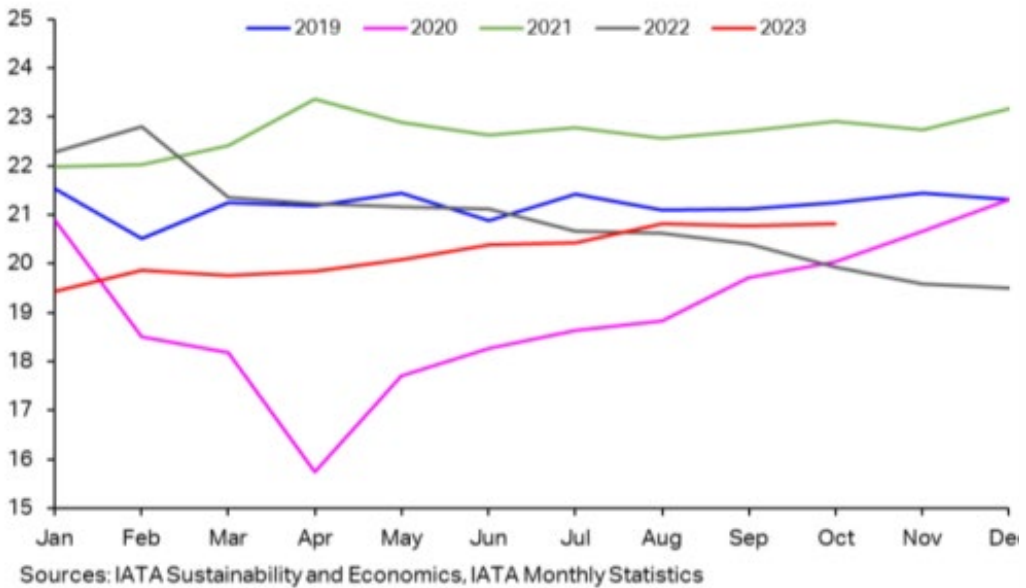
² IATA Resolution 672 Form of Multilateral E-Air Waybill Agreement. [Electronic resource]: <https://www.iata.org/contentassets/783ac75f30d74e32a8eaf26af5696b6/csc-672-en-28dec2019.pdf>. Last accessed 15.03.2024.

³ Sauv, D. E-AWB Implementation Playbook. February 2022. [Electronic resource]: <https://www.iata.org/contentassets/4bc75639b37641ba88f2e81e5516a020/e-awb-implementation-playbook.pdf>. Last accessed 19.05.2024.

⁴ Logistics Software for Sustainable Growth Scope. [Electronic resource]: <https://www.riege.com/>. Last accessed 19.05.2024.

⁵ Logistics software enabling you to move smarter, faster, and with full control. [Electronic resource]: <https://www.magaya.com/>. Last accessed 15.03.2024.





Pic. 2. Monthly CTK, seasonally adjusted (in billions of tkm)¹.

Logitude⁶ also offers a complete cloud-based freight forwarding platform with robust e-AWB services that include not only e-AWB generation and exchange, but also statistics monitoring, delivery time tracking, reporting, and more.

Smart AWB⁷ is a very easy-to-use cloud-based solution that allows freight forwarders to create, print, send, and track electronic AWB.

An alternative to purchasing a specific tool can be to integrate with one or more data exchange platforms. These global air cargo transportation communities enable accurate and efficient information exchange, connecting all parties involved in the transportation process (airlines, freight agents/forwarders, ground handling agents, shippers, customs, etc.).

Examples of some of the largest platforms are as follow.

TRAXON cargo HUB⁸ by CHAMP is the largest air cargo service provider, providing electronic communication between more than 100 airlines and more than 3000 freight forwarders. It helps automate booking, operations, document processing and customs

processes. TRAXON supports all types of messages, including those related to e-AWB exchange, booking, status check, error messages and others. API (Application Programming Interface) is provided to connect to the platform.

The Worldwide Information Network (WIN)⁹ is a platform that mainly serves independent freight forwarders, offering them easy connectivity to over 160 airlines for electronic booking and e-AWB generation, exchange and tracking. WIN can be accessed via the Internet or via web service API integration. In addition, it offers a mobile application for shippers that supports shipment tracking, rate inquiries, etc.

Cargonaut¹⁰ operates the Cargo Community information platform in Schiphol (Amsterdam), the largest Dutch cargo hub. It supports the exchange of data between all cargo parties and optimises the corresponding processes at the airport.

Distributed ledger (blockchain)

The improvement of the cargo transportation management system will be implemented in a distributed ledger system (blockchain). The

⁶ Electronic Air Waybill for Freight Forwarders. [Electronic resource]: <https://logitudeworld.com/eawb/>. Last accessed 15.03.2024.

⁷ Smart AWB [Electronic resource]: <https://www.smartawb.com/>. Last accessed 15.03.2024.

⁸ Traxon cargo HUB (digital platform). [Electronic resource]: <https://www.champ.aero/products/champ-ecargo/traxon-cargohub>. Last accessed 15.03.2024.

⁹ FREIGHTOSCOPE™. [Electronic resource]: <https://www.winwebconnect.com/index.html>. Last accessed 15.03.2024.

¹⁰ Schiphol and Cargonaut start using updated IT cargo platform. [Electronic resource]: <https://www.schiphol.nl/en/cargo/news/schiphol-and-cargonaut-start-using-updated-it-cargo-platform/>; <https://cargonaut.nl/>. Last accessed 15.03.2024.

use of this system will make more efficient the process of cargo tracking and movement of accompanying documents – air waybills, customs declarations, invoices, packing lists, safety data sheets, powers of attorney for receiving cargo and others. Electronic document management system and the Internet of Things are connected in a common distributed ledger system.

Blockchain is a decentralised transaction and data storage technology that helps individuals and businesses store and share value without the use of traditional intermediaries [6]. It is a cutting-edge technology that has the potential to upend traditional economic and social structures and replace them with systems that are more accessible, reliable, and stable. Blockchain technology is based on a globally distributed ledger that records and validates transactions using the properties of a large-scale peer-to-peer network [7]. A blockchain database is a permanent archive of transactions that occur between individuals or between customers and businesses. There are many blockchain implementations that are still under development. The data on the cost of a transaction is available to any user of the network with access privileges, making a blockchain-enabled transaction system extremely transparent [8]. This makes it very difficult to conduct fraudulent transactions. However, when making a transaction, network users choose what information about their identity they want to share with the rest of the network, leading to the use of pseudonyms. Digital technology has the potential to break down these barriers, allowing the supply chain to become a truly interconnected marketplace, fully open to all stakeholders – from producers of raw materials, goods and components to haulers of finished products from these suppliers and, ultimately, to end users [9].

Formation of a target solution to the problem

The integration of the Internet of Things and blockchain technology into intelligent transportation systems has the potential to transform the cargo industry by enabling efficient, secure, and reliable tracking and management of cargo across the entire supply chain. By using IoT sensors to track cargo in

real time and storing the data on a decentralised blockchain platform, intermediaries can be eliminated, reducing costs and increasing transparency. The use of smart contracts can automate many processes, reduce manual intervention and increase the speed and accuracy of transactions [10].

Blockchain technology – maintenance of a distributed ledger must correspond to the process of physical movement of cargo, from the point of departure, through the cargo terminal of the departure point, on board an aircraft, to the cargo terminal of the destination. The process of tracking the movement of cargo is not possible without the Internet of Things (IoT). The Internet of Things, or IoT for short, is a term for the concept of connecting a wide range of devices to the Internet – and to each other. Essentially, IoT is a huge global network of connected devices, gadgets, machines, and the people using them. All devices connected to the IoT collect and exchange data about their usage and the environments in which they operate. «The Internet of Things (IoT), as an important part of the new generation of information technology, connects any object to the Internet in accordance with an agreed protocol through radio frequency identification, global positioning system and other information and measurement equipment for the exchange of information and communication. The continuous development of the Internet of Things technology has given new strength to its further development and improvement. The Internet of Vehicles (IoV) is within the focus of IoT» [11].

Supply chain management is a complex and multifaceted area, and, as a business scales, it can become very complex. A single shipment can involve dozens of operations and tasks at once.

The combination of IoT and blockchain technologies will allow managing large volumes of cargo transportation and will become an important step in implementation of new digital methods, including creation of digital platforms, will allow optimising cargo transportation routes. In particular, one of the future vectors of development of air cargo transportation is associated with creation of cargo hubs and the use of a network of cargo airports for these purposes. The idea is far from new, for example, in the USA, cargo



hubs have been developed in Rickenbacker – Columbus (Ohio) and the Stockton Metropolitan (California) airports [12]. In China, a specialised air cargo hub has been opened in Ezhou Huahu International Airport¹¹. The history of development of Russian civil aviation records an attempt to create a cargo airport on the grounds of the former military airfield «Veshchevo»; the program for development of the transport system of St. Petersburg and Leningrad region for the period up to 2020 provided for construction of the Ust-Luga cargo airport¹².

The use of a hub network and cargo handling system can lead to significant savings in transportation costs, with the number of hubs and their location being decisive factors.

Digital platforms and technologies will make management of cargo transportation through hub cargo airports transparent for cargo clients and efficient for the carrier.

CONCLUSION

Analysis of technology already implemented in air cargo transportation and the assessment of the outlook for their future developments should be complemented in the course of further research by the study on fields of introduction of the end-to-end technologies like big data; neurotechnology and artificial intelligence; quantum technologies; new manufacturing technologies; industrial internet; robotics components and sensors; wireless communication technologies; virtual and augmented reality technologies.

¹¹ China opens Asia's first dedicated cargo airport in Ezhou, Central China's Hubei Province. [Electronic resource]: <https://www.globaltimes.cn/page/202207/1270695.shtml>. Last accessed 15.03.2024.

¹² Program for development of the transport system of St. Petersburg and Leningrad Region for the period up to 2020. Approved by the Coordinating Council for the development of the transport system of St. Petersburg and Leningrad Region: Volume 5, page 16, September 9, 2014.

REFERENCES

1. Merkert, R., Van de Voorde, E., de Wit, J. Making or breaking – Key success factors in the air cargo market. *Journal of Air Transport Management*, 2017, Vol. 61, pp. 1–5. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2017.02.001.
2. Budiarto, S., Putro, H. P., Pradono, P., Yudoko, G. Revenue management of air cargo service in theory and practice. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, Vol. 158, Iss. 1, 012022. DOI: 10.1088/1755-1315/158/1/012022.
3. Warner, K. S. R., Wäger, M. Building Dynamic Capabilities for Digital Transformation: An Ongoing Process of Strategic Renewal. *Long Range Planning*, 2018, Vol. 52, Iss. 3, pp. 326–349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2018.12.001>.
4. Bibri, S. E., Krogstie, J. A Novel Model for Data-Driven Smart Sustainable Cities of the Future: A Strategic Roadmap to Transformational Change in the Era of Big Data. *Future Cities and Environment*, 2021, Vol. 7, 25. DOI: 10.5334/fce.116.
5. Zhu, L., Yu, F. R., Wang, Y., Ning, B., Tang, T. Big Data Analytics in Intelligent Transportation Systems: A Survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2019, Vol. 20, Iss. 1, pp. 383–398. DOI: 10.1109/TITS.2018.2815678.
6. Yuan, Y., Wang, F.-Y. Towards Blockchain-based Intelligent Transportation Systems. *19th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2016)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2016, pp. 2663–2668. DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795984.
7. Qian, Yongfeng; Jiang, Yingying; Chen, Jing; Zhang, Yu; Song, Jeungeun; Zhou, Ming; Pustišek, M. Towards decentralized IoT security enhancement: A blockchain approach. *Computers and Electrical Engineering*, 2018, Vol. 72, pp. 266–273. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2018.08.021.
8. Pervez, H., Haq, I. U. Blockchain and IoT Based Disruption in Logistics. In: *2019 2nd International Conference on Communication, Computing and Digital systems, C-CODE 2019*, pp. 276–281. DOI: 10.1109/C-CODE.2019.8680971.
9. Helo, P., Shamsuzzoha, A. H. M. Real-time supply chain – a blockchain architecture for project deliveries. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, Vol. 63, 101909. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101909.
10. James, M., Chinchy, M. Blockchain and IoT Integration for Smart Transportation in Cargo. Conference: *The 2nd International Conference on Modern Trends in Engineering Technology and Management: December 2023*, pp. 274–281. DOI: <https://doi.org/10.21467/proceedings.160.35>.
11. Lv, H., Lloret, J., Song, H. Guest Editorial Introduction to the Special Issue on Internet of Things in Intelligent Transportation Infrastructure. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, Vol. 24, Iss. 11, pp. 12843–12851. DOI: 10.1109/TITS.2023.3324790.
12. Schwieterman, J. P., Hague, E. The Rise of Cargo-Focused Hub Airports: Pandemic Year 2020. [Electronic resource]: https://www.researchgate.net/publication/351274481_The_Rise_of_Cargo-Focused_Hub_Airports_Pandemic_Year_2020. Last accessed 19.05.2024. ●

Information about the author:

Zhukov, Vasily E., Ph.D. (Eng), Associate Professor at Saint Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov (SPbGUGA), Saint Petersburg, Russia, vasizhukov@yandex.ru.

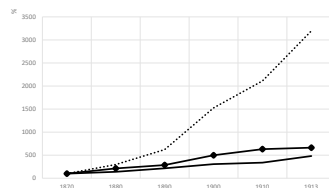
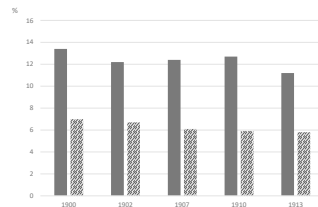
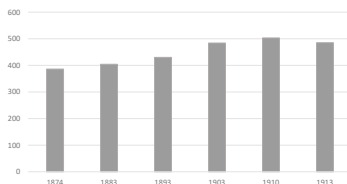
Article received 19.05.2024, approved 16.09.2024, accepted 20.09.2024.



HISTORY OF INNOVATION: RAILWAYS

234

Innovations as an integral driving force of the development of railways in Russia in the late 19th – early 20th centuries. Chronology and relationship between infrastructure development, traffic growth and improvement of technical solutions.



HISTORY WHEEL





Innovations as Basis for Strengthening the Market Position of Railways

(example of the Russian cargo transportation market in the late 19th – early 20th centuries)



Dmitry A. MACHERET



Anastasia V. KUDRYAVTSEVA

Dmitry A. Macheret¹, Anastasia V. Kudryavtseva²

^{1, 2}Joint-Stock Company «Research Institute of Railway Transport» (JSC «VNIIZhT»); Joint Scientific Council of JSC Russian Railways; Russian University of Transport, Moscow, Russia.

¹ ORCID 0000-0002-1322-3030; Russian Science Citation Index Author ID: 380766.

² ORCID 0000-0001-6813-9867; Russian Science Citation Index Author ID: 763551.

✉ ¹ macheretda@rambler.ru.

ABSTRACT

The formation of a large-scale railway network in Russia by the end of the 19th century contributed to a significant acceleration of the country's socio-economic development, thanks notably to the increase in volumes, improved quality and efficiency of cargo transportation.

The objective of the study described in the article is to analyse the expansion of the scale of activity and strengthening of the position of Russian railways in the cargo transportation market in the late 19th – early 20th centuries and to identify the significance of the introduction of innovations in the industry using the methods of historical and statistical analysis, assessment of the innovativeness of rolling stock and technics and benchmarking.

The study revealed that the enhancement of the economic role of railways, including the growth of their share in the cargo transportation market in the period under review was determined by the synergy of the increase in the length of the railway network

and its increasingly intensive use due to the innovation-focused development of the railway industry. Innovations covered all aspects of development of the country's railways: construction and maintenance of railway infrastructure, design of rolling stock and its operations management. In particular, the high dynamism of innovative improvement of design characteristics of cargo locomotives and wagons was confirmed by the growth of the corresponding innovation coefficients.

Innovation-focused development of Russian railways in the period under review allowed them to take leading positions in the national cargo transportation market and, as it is evidenced by the performed cross-country comparisons, to achieve world leadership as for several key production and economic indicators. This historical experience is very interesting in modern conditions, when railways prioritise innovations to solve long-term problems of effective positioning in the transport and logistics services market.

Keywords: transport system, railways, cargo transportation market, competitiveness, cargo transportation intensity, cargo transportation efficiency, innovation-focused development.

For citation: Macheret, D. A., Kudryavtseva, A. V. Innovations as Basis for Strengthening the Market Position of Railways (example of the Russian cargo transportation market in the late 19th – early 20th centuries). World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 234–244. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-14>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

INTRODUCTION

The approaching bicentennial of railways is a good incentive to deepen research into the history of railway transport, including railways' economic history. Russia was one of the first countries in the world (the seventh in a row [1]) to establish railway transportation – as early as in 1837, 12 years after the appearance of the first public railway and 7 years after steam-powered railways had been recognised as an effective and promising mode of transport [2; 3, P. 15]. Although the railway network in our country had developed at a slow pace for three decades after that, then, in the context of deep social reforms, institutional mechanisms were created that ensured a radical acceleration of railway construction [4–6]. The rate of commissioning of new railway lines increased sharply from 1868 [7, P. 35], and by the end of the 1870s, a large-scale railway network with a length of over 20 thousand km was created in the country, connecting the main regions of the European part of the country into a single economic space and contributing to acceleration of socio-economic development [8; 9].

In the 1890s, rates of railway construction were record in all the Russian history [10], and by the beginning of 20th century, Russia took second place in the world in terms of the length of the railway network [11]. At the same time, there was a qualitative improvement in railway technology and management of the transportation process, which, together with the positive impact of development of railway transport on the country's economy, was revealed in the works [1; 7–9; 12–15] and several others.

Nevertheless, many aspects of development of Russian railways in 19th – early 20th centuries require additional study and understanding.

The objective of the article is to analyse the expansion of the scale of activity and strengthening of the position of Russian railways in the cargo transportation market during the specified period and to reveal the significance of implementation of innovations in the industry as a tool for that. To achieve this objective of the study, *methods* of historical and statistical analysis were used, as well as assessment of the innovativeness of technical means and benchmarking.

RESULTS

Growing importance of railways in the Russian transport system

In the pre-railway era, the main modes of transport in Russia, as in other countries, were horse-drawn carriages and inland waterways. At the same time, the possibilities for transporting goods on dirt roads were limited due to the autumn and spring muddy seasons of bad roads. The time of limited travelling was, for example, four months a year in Kursk and Tula provinces, four to five months in Penza and Ryazan provinces, six months in Kostroma province, and lasted most of the year in Perm, Vologda, Arkhangelsk and a few other provinces [16, P. 129]. As the founder of the economics of railway transport [in Russia] A. I. Chuprov noted, «sometimes the roads were so bad that the cabbies, having unloaded the goods, quickly escaped», while delivery of goods on time «was a matter of sheer luck» [17, P. 13]. The duration of navigation on inland waterways was limited to the period from ice break-up (the final clearing of the waterway from ice) to freeze-up and was five to seven months a year [17; 18]. These transport constraints had an extremely negative impact on the economic and social development of the country. Nevertheless, waterways, which had a high carrying capacity during the navigation period, were considered the basis for trunk cargo transportation.

During the discussions about the possibility and necessity of building railways in Russia, which unfolded in the early 1830s, some supporters of their construction viewed railways as auxiliary transport arteries leading to the main shipping rivers along which domestic trade was carried out over long distances. Opponents of railway construction argued their position, among other things, by the fact that railway transport was inferior to cheaper water transportation of goods [19]. Thus, we can say that at that time there was a consensus regarding the leading role of inland water transport in implementation of trunk transportation of goods. However, as was the case of many breakthrough innovations both before and after the railways, their implementation not only refuted the arguments of sceptics, but also exceeded the expectations of their supporters. Already in the second half of the 1870s, railways carried almost 24 % more cargo than inland water transport, and their share subsequently grew steadily (Table 1).



Table 1

Distribution of trunk cargo transportation in Russia between railway and inland water transport in the late 19th – early 20th century

Years	Volume of cargo transportation, million tons			Share of railway transport, %
	Water transport	Railway transport	In total	
1876–1880 (on average)	13,956	17,248	31,204	55,3
1881–1885 (on average)	13,956	23,227	37,183	62,5
1886–1890 (on average)	16,626	29,50	46,126	64,0
1891–1895 (on average)	20,115	37,183	57,298	64,9
1896–1898 (on average)	27,584	49,943	77,527	64,4
1913	50,90	158,20	209,10	75,7

Source: compiled and calculated by the authors based on data [13; 18; 20].

Table 2

Changes in the coefficient of transportation* by rail of some important goods late 19th – early 20th centuries

Years	Goods		
	Bread (grain)	Coal	Oil
1882–1886 (on average)	0,163
1892–1896 (on average)	0,221	0,643	0,196
1902–1906 (on average)	0,232	0,727	0,168
1913	0,221	0,782	0,473

Source: [1].

* [Ratio of goods transported to the volume of the total production of those goods].

Table 3

Distribution of transportation of main types of cargo between railway and inland water transport in the European part of Russia (according to data for 1898), %

Goods	Railway transport	Inland water transport
Main breads	69,4	30,6
Salt	61,5	38,5
Coal	98,6	1,4
Oil products	47,7	52,3
Forest building materials and firewood	31,1	68,9
Others	82,0	18,0
Total	64,9	35,1

Source: calculated by the authors based on data from the Appendix to the Statistical Digest of the Ministry of Railways. Issue 59. St. Petersburg, Department of Statistics and Cartography of the Ministry of Railways, 1900.

An ever-increasing share of the most important transport-intensive goods produced in the country were transported by rail (Table 2). At the same time, specialisation of transport modes emerged: coal, salt, and grain cargo were transported to a greater extent by rail, while timber building materials and firewood were transported by waterways (Table 3). From the point of view of the competitiveness of railways in the transport market and their role in the country's economy, it is important that at the end of the 19th century most of the «other» cargo (which included various types of finished products intended for both industrial and personal consumption) were already transported by rail. Subsequently, an accelerated growth in the railway transportation of many types of such

goods continued. For example, in 1909–1913, compared to the period 1894–1900, the average annual volume of railway transportation of fresh fruits and berries increased by almost 2,6 times, fresh vegetables – by 3,8 times, iron, steel and cast iron – by 2,4 times, agricultural machinery – by 4,8 times [14, pp. 323–324].

The main advantages of rail transport were regularity and higher speed. At the same time, the estimate of the average usual speed of delivery of goods by rail over long distances of «300 versts¹ per day» [17, P. 13] cited by A. I. Chuprov and dating back to the 1870s seems overstated. However, at that time there was no necessary statistical base for such estimates. The

¹ 1 verst = 1 066,8 m

first surveys of speed of movement of goods transported in wagonload shipments on Russian railways were conducted in August-September 1907, 1910, 1911, 1912 along some specific routes [21, P. 59]. The average values of delivery speed on these routes fluctuated from 100 to 148 kilometres per day. A summary of the results of these surveys made it possible to determine that the average value of delivery speed for all of them was 141 km/day with an average transportation distance of 1103 km (which was more than twice the average network transportation distance of that period²). The obtained value of delivery speed, by modern standards, is small. However, it completely coincides with the average network value of the delivery speed of wagonload shipments in the corresponding distance range according to data for September 1949 (!)³, when regular recording of speed and delivery times of goods was introduced. (The coincidence of the month of survey with the periods of the above-mentioned surveys is important, since the speed of cargo delivery varies significantly seasonally [22; 23]). Thus, the technological advantages of railways – all-season transportation, urgency of cargo delivery, high transit capacity – in combination with cheaper delivery over long distances [8; 17] determined the increase in their importance in the transport system of Russia and a growth of their share in the market of trunk cargo transportation. At the same time, local transportation over short distances (up to 25 km) remained more profitable to carry out by horse-drawn transport [16, P. 128]. Specialisation and interaction of various types of internal transport – railway, water and horse-drawn ones – allowed commodity owners to build the most profitable schemes for delivering their goods to various markets.

In the context of this study, it is important to note that since the end of the 19th century, railways have played a leading and increasingly significant role in the Russian cargo transportation market. It should be noted that the strengthening of the position of railways in the Russian cargo transportation market correlates with the acceleration of the country's economic

development in the late 19th – early 20th centuries [15; 24]. This confirms a polemical nature of the conclusions of Nobel laureate Robert W. Fogel, who, based on the construction of a counterfactual model of 19th century's US economy, came to the conclusion that the absence of railways and the use of inland waterways instead would have slowed down economic development for only a few years [25; 26], and testifies to the validity of the opinion that Fogel's model did not fully consider the macroeconomic effects of development of the railway network, in particular, those associated with acceleration of cargo transportation [27]. There is every reason to believe that such impressive results in the leading economies of the world in that era, which are noted in modern macroeconomic studies, could be achieved only based on the development of railway transportation [11; 27; 28].

Growth in the scale and intensity of railway cargo transportation

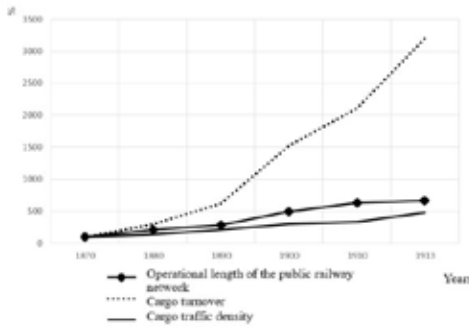
The increase in the economic importance of railways and their share in the cargo transportation market was certainly associated with the development of the railway network, the length of which increased more than 6,6 times from 1870 to 1913, and as this growth occurred, more and more areas, settlements, and enterprises gained direct access to railways. However, while noting the growth in the length of railways, it is also necessary to pay attention to their increasingly intensive use. The density of cargo traffic, defined as the ratio of cargo turnover to the operational length of the network, grew slightly slower than the railway network itself (more than 4,8 times over the same period), which, in synergy with the growth of the network, made it possible to increase cargo turnover by almost 32 times (Pic. 1).

The growth in cargo traffic density was ensured, firstly, by increasing the saturation of the network with rolling stock (Pic. 2), which is evidence of an increase in the degree of implementation of the railways' capacity (in this case, the actual volumes of traffic could exceed the calculated ones [29, P. 102]) and the growth of their carrying capacity. The latter is also confirmed by the fact that the number of wagons and coaches grew faster than the number of locomotives. This means that the number of wagons with the train and its weight increased, and even with the same number of trains, it was possible to increase the volume of cargo transportation.



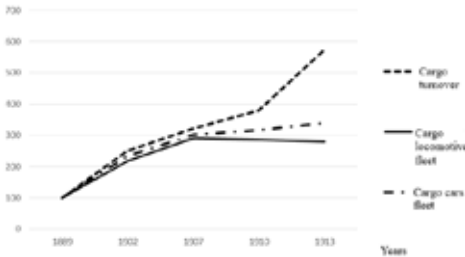
² This circumstance is significant, since with the increase in the distance of transportation, the speed of delivery of goods tends to increase [22].

³ Delivery duration and speed of cargo movement on railways in 1949–1953. Materials on railway transport statistics. Issue 267. Moscow, 1953, 232 p.



Pic. 1. Dynamics of development and use of the Russian railway network for cargo transportation in the late 19th – early 20th centuries (1870 = 100 %).

Source: calculated by the authors based on data from [7; 12; 18].



Pic. 3. Comparison of the dynamics of cargo turnover and cargo rolling stock fleets on the Russian railway network (excluding local roads) in the late 19th – early 20th centuries.

Source: calculated by the authors based on data from [18; 29].

An even more vivid characteristic of the growth of railway carrying capacity is provided by a comparison of the dynamics of cargo turnover and the fleet of cargo rolling stock (Pic. 3). A faster growth of cargo turnover compared to the fleet of cargo wagons indicates an increase in the dynamic load and productivity of the wagon. And a faster growth of the fleet of cars compared to the fleet of steam locomotives, as already noted, indicates an increase in the average composition and weight of the train. Both factors together characterise the growth of the productivity of the use of steam locomotives and the carrying capacity of railways.

An important characteristic of the expansion of the geographical scale of railway cargo transportation is the fairly stable trend of increasing their average distance (Pic. 4), which intensified after, thanks to the construction of the Great Siberian Route – the Trans-Siberian Railway, the railway network stepped beyond the Urals and reached the Pacific Ocean [30; 31].

It should be noted that during the discussions on the options for organising transport links between Siberia and the Far East and the

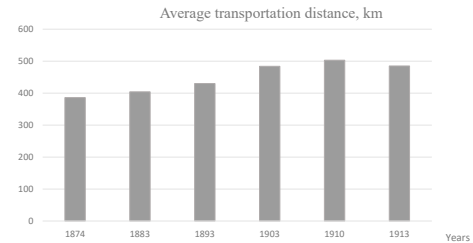


Pic. 2. Dynamics of saturation of the Russian railway network with rolling stock in the late 19th – early 20th century (1889 = 100 %).

* The share of passenger locomotives was 15–20 %.

** In 1907–1913 – including auxiliary ones.

Source: calculated by the authors based on data [7; 18; 29].

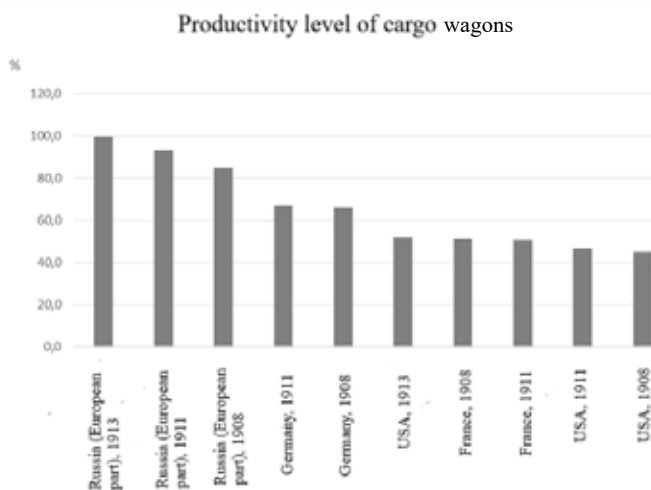


Pic. 4. Dynamics of change in average distance of cargo transportation on the Russian railway network in the late 19th – early 20th centuries.

Source: calculated by the authors based on data from [18; 29].

European part of the country, the alternative of railway and water transport was again revealed. Some scientists, in particular, A. I. Chuprov [32, P. 180], and government officials, in particular I. A. Vyshnegradsky [33, P. 54], who held the post of the Minister of Finance in 1887–1892, spoke against building a continuous rail route through the eastern regions of the country, but advocated only connecting river basins by rail, thus forming a rail-water link and reducing the required length of rail lines by more than half. Although less expensive, implementation of such a project would certainly not have ensured such regularity and speed of transportation, nor such carrying capacity, and would not have opened up such large-scale prospects for the long-term socio-economic development of Siberia and the Far East as creation of a continuous railway connection of the European part of the country to the Pacific Ocean, which was eventually implemented [30; 31].

During the construction of the Trans-Siberian Railway, several innovative solutions were implemented, from the mechanisation of earthworks, including the use of «multi-bucket excavators manufactured at the Putilov Plant»,



Pic. 5. Comparison of the level and dynamics of cargo wagon productivity (per unit of carrying capacity) of the world's leading railway systems at the beginning of the 20th century, %.
Source: compiled by the authors based on data from [1].

as well as trucks [31, P. 199], to unique engineering solutions in the field of artificial structures [30; 34].

At the same time, the developments of Russian railways in the late 19th – early 20th centuries were innovation-focused, which deserves detailed consideration.

Innovative basis for increasing the intensity and efficiency of cargo railway transportation

A retrospective analysis of the main innovations in the field of railway transport shows that if in the 1830s and 1840s most of these innovations appeared in Great Britain, then starting from the 1850s more and more innovations were carried out in Russia [35, pp. 55–58]. Their implementation made it possible to use the infrastructure and rolling stock more intensively and economically, thereby increasing the supply of railway cargo transportation and strengthening the position of railways in this market.

The largest innovation in the field of cargo transportation management, which was not only technological but also institutional in nature, «was the original system of mutual use of cargo wagons» [1, P. 66], fully implemented in 1889 after more than 20 years of improving the interaction between distinct railways in the field of using cargo wagons [7, pp. 63–65]. Within the framework of this system, «the entire cargo wagon fleet of a single-gauge network can be provided for free common use by all railways, provided that:

1. The size of the cargo wagon fleet of each individual railway is constantly maintained.

2. The established quality and condition of cargo wagons is constantly maintained» [1, P. 67].

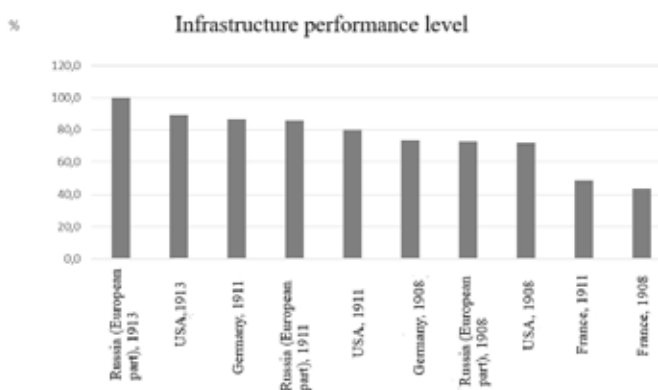
The system of mutual use of cargo cars can be considered a prototype of a modern economy of shared use of resources [36–38]. The introduction of this system made it possible to implement non-reloading transportation between all Russian railways, thereby significantly accelerating and reducing the cost of transporting goods and ensuring, in synergy with other technical and technological innovations, a significantly more productive and progressively improving use of wagons compared to other railway systems. This is clearly seen from the data in Pic. 5, formed based on the benchmarking method, actively used in scientific research in the field of railway transport [39; 40].

The efficient use of cargo wagons contributed to the intensification of the use of infrastructure for cargo transportation (Pic. 6). The analysis of the data presented in Pics. 5 and 6, using the methodology proposed by Nobel laureate in economics Edmund Phelps [41], allows us to conclude that the Russian railways had a high level of dynamism, i.e. the desire and ability to innovate, at the beginning of the 20th century.

Innovations covered all aspects of the development of the country's railways.

In the track divisions, the most important innovations were associated with the transition to the use of steel rails, the use of heavier types





Pic. 6. Comparison of the level and dynamics of productivity of the use of railway infrastructure for cargo transportation (density of cargo transportation) of the leading railway systems of the world at the beginning of the 20th century, %.

Source: calculated by the authors based on data from [1].

of rails, the improvement of rail fastenings, the use of sleeper impregnation, and the improvement of the track maintenance and repair system [1; 42]. Some railways tested and applied innovative designs of under-rail foundations using concrete, asphalt concrete, and reinforced concrete [43; 44].

The rolling stock was improved. Due to several improving innovations, the power of steam locomotives increased, steam distribution was improved, boiler pressure and axle load increased. On this basis, opportunities opened for increasing the weight and speed of trains, as well as the cost-effectiveness of transportation. Modern methods for assessing the innovativeness of technics [45–47] make it possible, based on data from [48], to assess the dynamics of the growth of the innovativeness of freight steam locomotives produced in Russia in the late 19th – early 20th centuries (Table 4).

The fleet of cargo wagons was also qualitatively improved on an innovative basis: increased payload and cargo capacity, reduced tare ratio, etc. [1; 49]. A significant increase in the level of innovation was typical for different types of wagons (Table 5), including wagons with increased payload capacity, which appeared at the beginning of the 20th century (Table 6).

An important component of the innovative development of rolling stock was the production and use of specialised cargo wagon. As early as 1862, refrigerated wagons for transportation of perishable goods appeared, in 1868 dump wagons appeared with a tipping body for bulk cargo, and in 1872 there appeared domestically produced tank wagons [42, pp. 89–90]. Other types of specialised wagons were also produced

[1, P. 101]. By the beginning of the 20th century, the share of specialised wagons within the fleet exceeded 13 % (Pic. 7). Although it did not grow in subsequent years, moreover, the increase in the number of specialised wagons lagged behind the overall growth rate of the fleet, the fleet of specialised wagons made it possible to satisfy the growing demand for transportation of non-bulk cargo. At the same time, fundamentally new wagons appeared. For example, in 1910, the first isothermal wagon with mechanical cooling was built [49, P. 40]. In general, the specialisation of the fleet of wagons contributed to the strengthening of the positions of railways in the cargo transportation market.

It is important to note that the innovations were implemented by specific railways that were entities in the transport market and interested in increasing their efficiency and competitiveness [1, pp. 65–66, 94–96, 102]. If successful, their application was expanded to the entire network. A good example was the increase in the carrying capacity of a standard cargo wagon from 900 to 1000 poods⁴ in 1907 on the South-Eastern Railways. Soon it began to be used on the Catherine's and Vladikavkaz Railways, and since 1910 it was approved by the Ministry of Railways for the entire railway network [1, P. 65].

The system of mutual use of cargo wagons, in turn, «grew» from agreements between neighbouring railways on the organisation of uninterrupted service and was finally implemented based on an network-wide agreement between all the railways [7, pp. 64–65]. At the same time, no «common fleet» of wagons based on its

⁴ 1 pood – 16,38 kg.

Table 4

Increasing the level of innovation of Russian cargo locomotives in 19th – early 20th centuries

Steam locomotive series	Start of construction, year	Power, hp	Pressure in the boiler, atm.	Axle load, tf	Speed, km/h	Innovation coefficient
D	1845	140	8	11	15	1
G	1863	150	8	11	20	1,10
O ^p	1897	400	11	12	50	2,16
O ^v	1905	420	11	12	50	2,20
Sch	1906	550	14	14	65	2,82
E	1912	1000	12	16	65	3,61

Source: compiled and calculated by the authors based on data [48].

Table 5

Increasing the level of innovation of Russian cargo wagons in 19th – early 20th centuries

Type of a wagon	Type of wagon design (built by)	Start of construction, year	Specific load capacity, t/axle	Specific bearing capacity, m ³ /axle	Specific floor area, m ² /axis	Tare coefficient	Innovation coefficient
Covered	Petersburg-Moscow railway	1846	2,05	9,775	4,9	0,95	1
	Peterburg- Warsaw railway	1860	4,1	23,1	8,9	0,73	1,87
	Petersburg-Moscow railway, rebuilt from four-axle to two-axle	1863	4,7	19,55	9,8	0,78	1,88
	Non-braking, of Kovrov workshops with trusses	1870	5	20,05	8,75	0,58	1,98
	Non-braking, of Kolomna plant	1879	6,25	18,1	7,9	0,52	2,08
	Normal 12,5 t, non-braking	1892	6,25	20,0	8,8	0,54	2,16
	Normal 16,5 t, non-braking	1911	8,25	19,5	8,8	0,43	2,50
Platforms	Petersburg-Moscow railway	1846	2,5	-	5,625	0,60	1
	Peterburg- Warsaw railway	1860	6,25	-	8,7	0,39	1,86
	Kolomna plant	1878	6,75	-	11,75	0,38	2,12
	Three-axle	1881	5,0	-	7,87	0,48	1,55
	Normal type, non-braking	1892	6,25	-	12,45	0,54	1,94
Gondola	For coal transportation with wooden body frame	1861	5,0	4,0	-	0,42	1
	For coal transportation with steel channels, non-braking	1880	6,25	10,0	-	0,48	1,54
Tanks	For transportation of oil, non-braking	1872	5,0	5,85	-	0,62	1
	For transportation of normal type oil, non-braking	1895	7,5	7,75	-	0,50	1,35
	For transportation of gasoline	1908	7,5	9,25	-	0,58	1,38

Source: compiled and calculated by the authors based on data [49].



Table 6

Increasing the level of innovation of Russian cargo wagons with increased carrying capacity in 19th – early 20th centuries

Type of a wagon	Type of wagon design (built by)	Start of construction, year	Specific load capacity, t/axle	Specific bearing capacity, m ³ /axle	Load from the axle of the wheel set on the rail, kN	Tare coefficient of a non-braking car	Innovation coefficient
Covered	Moscow-Kazan railway, without bogies	1905	6,875	16,4	109	0,45	1
	South-West Railways	1906	9,375	25	138	0,48	1,27
	Central Asian railway	1909	9,375	19,5	144	0,55	1,21
	Catherine's Railway	1906	8,33	25	119	0,42	1,22
Platforms	Petersburg-Warsaw railway	1903	8,25	-	109	0,42	1
	Elongated	1908	8,25	-	125	0,51	0,99
Gondola	Coal	1908	7,5	9	130	0,40	1
	With metal body	1906	9,375	12,5	134	0,43	1,15
	Catherine's Railway	1906	8,33	10,7	113	0,36	1,06
Tanks	Vladikavkaz and Kazan railways	1895	6,25	7,25	97	0,54	1
	South-Eastern railways	1898	8,25	9,5	119	0,45	1,26

Source: compiled and calculated by the authors based on data [49].

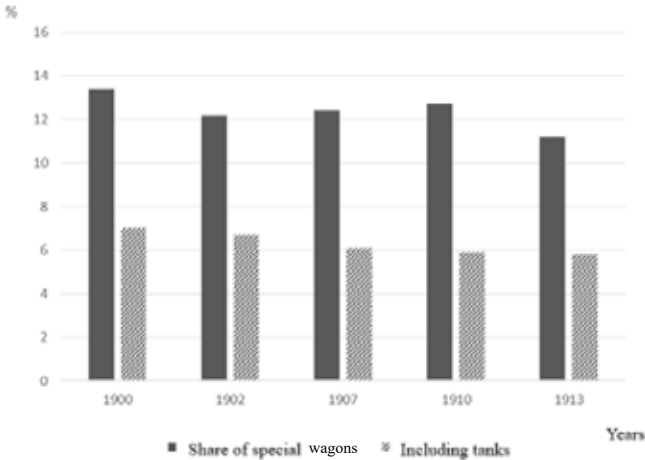
centralisation was created, but mutual use of fleets belonging to specific railways was ensured. This experience is noteworthy in the context of modern discussions on the optimisation of cargo wagon fleet management [50].

Based on the innovation-focused development of Russian railways in the context of growing commodity production and the transportation market in the country, while pursuing a rational government economic policy [14; 51; 52], railway industry achieved high efficiency indices. By the beginning of the 20th century, in terms of return on invested capital, Russian railways

ranked second among the leading railway systems in the world [12, P. 303], and in terms of the level of economic efficiency of current activities (according to the criterion of the minimum coefficient of operating costs) in 1913 they were at the top [53, P. 103].

CONCLUSION

The analysis of the development of railway transport in the late 19th – early 20th centuries, carried out using the Russian railway industry as an example, has shown that already in the first phase of the evolution of railway transport – the



Pic. 7. Changes in the level of specialisation of cargo wagons on the Russian railway network at the beginning of the 20th century.
Source: calculated by the authors based on data from [18].

phase of predominantly extensive development [27, P. 130], the intensification of railway activity was carried out on an innovative basis, which became the foundation for the development and growth of the industry's efficiency in the second phase of its evolution [27, pp. 131–133]. The innovation-focused development of Russian railways in the period under review, which was positively influenced by the multicentricity of development and implementation of innovative solutions, allowed them to take leading positions in the national cargo transportation market and achieve world leadership as for several key production and economic indicators.

This historical experience is very interesting in modern conditions, when railways are solving long-term problems of their effective positioning in the transport and logistics services market through creation of an innovative basis [54; 55].

REFERENCES

1. A century of railways [Stoletie zheleznykh dorog]. Moscow, Transpechat publ., 1925, 261 p.

2. Smil, V. Energy and Civilization: A History. Cambridge, MA, The MIT Press, 2017, 564 p. ISBN 9780262338301.

3. Sotnikov, E. A. Railways of the world from 19th to 21st century [Zheleznie dorogi mira iz XIX v XXI vek]. Moscow, Transport publ., 1993, 200 p.

4. Golovachev, A. A. History of railway business in Russia [Istoriya zheleznodorozhnogo dela v Rossii]. Moscow, Publishing house «Delo» RANEPa, 2016, 534 p. ISBN 978-5-7749-1167-7.

5. Golubev, A. A. Concession-induced prosperity of the Russian railroads. Otechestvennye zapiski, 2013, Iss. 3 (54), pp. 271–282. EDN: RWIPHP.

6. Macheret, D. A., Epishkin, I. A. Mutual influence of institutional and transport factors of economic development: retrospective analysis. Journal of Institutional Studies, 2017, Vol. 9, Iss. 4, pp. 80–100. DOI: 10.17835/2076-6297.2017.9.4.080-100.

7. Sotnikov, E. A., Levin, D. Yu., Alekseev, G. A. History of development of the transportation process management system in railway transport (domestic and foreign experience): Monograph [Istoriya razvitiya sistemy upravleniya perevoznym protsessom na zheleznodorozhnom transporte (otechestvennyi i zarubezhnyi opyt): Monografiya]. Moscow, Tekhninform publ., 2007, 237 p. EDN: TUAPLT.

8. Zagorsky, K. Ya. Transport Economics [Ekonomika transporta]. Moscow-Leningrad, Gosizdat publ., 1930, 368 p.

9. Macheret, D. A. Creation of Railway Network and Acceleration of Development of Russia. World of Transport and Transportation, 2012, Vol. 10, Iss. 4 (42), pp. 184–192. EDN: PFFKVX.

10. Khusainov, F. I. Brief history of railway cargo tariffs in Russia [Kratkaya istoriya zheleznodorozhnykh gruzovykh tarifov v Rossii]. Ekonomicheskaya politika, 2015, Vol. 10, Iss. 5, pp. 91–141. DOI: 10.18288/1994-5124-2015-5-05.

11. Macheret, D. A., Valeev, N. A., Kudryavtseva, A. V. Formation of the railway network: diffusion of epochal innovation and economic growth [Formirovanie zheleznodorozhnoi seti: diffuziya epokhalnoi innovatsii i ekonomicheskii rost]. Ekonomicheskaya politika, 2018, Vol. 13, Iss.1, pp. 252–279. DOI: 10.18288/1994-5124-2018-1-10.

12. Solovieva, A. M. Railway transport of Russia in the second half of 19th century [Zheleznodorozhnyi transport Rossii vo vtoroi polovine XIX v.]. Moscow, Nauka publ., 1975, 318 p.

13. Lyashchenko, P. I. History of the national economy of the USSR. Volume II. Capitalism [Istoriya narodnogo khozyaistva SSSR. Tom II. Kapitalizm]. Moscow, Gospolitizdat publ., 1952, 736 p.

14. Davydov, M. A. Twenty years before the Great War: Russian modernisation of Witte-Stolypin [Dvadsat let do Velikoi voyny: rossiiskaya modernizatsiya Witte-Stolypina]. St.Petersburg, Aleteya publ., 2016, 1081 p. ISBN 978-5-90670-504-4.

15. Macheret, D. A. Railway Network Development and the «Big Economic Breakthrough» in Russia. World of Transport and Transportation, 2022, Vol. 20, Iss. 5 (102), pp. 104–112. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-5-12.

16. Golts, G. A. Horse-drawn transport and horse-drawn routes in Russia. (Historical essay) [Guzhevoi transport i guzhevie puti soobshcheniya v Rossii (Istoricheskiy ocherk)]. Russia and the modern world, 2007, Iss. 1 (54), pp. 119–139. EDN: HYTJWX.

17. Chuprov, A. I. Railway economy. Its economic features and its relationship to the interests of the country [Zheleznodorozhnoe khozyaistvo. Ego ekonomicheskie osobennosti i ego otnosheniya k interesam strany]. Moscow, Printing house of A. I. Mamontov and Co., 1875, 362 p.

18. Bepalov, N. G., Eliseeva I. I. Russian Railways in 20th Century in the Mirror of Statistics [Zheleznie dorogi Rossii v XX veke v zerkale statistiki]. St.Petersburg, Nestor-History, 2008, 226 p. ISBN 978-5-981-872-396.

19. Schenk, F. B. Russlands Fahrt in die Moderne. Mobilität und sozialer Raum im Eisenbahnzeitalter. Stuttgart, Franz Steiner, 2014, 456 p. [Electronic resource]: https://www.academia.edu/9342941/Russlands_Fahrt_in_die_Moderne_Mobilität_und_sozialer_Raum_im_Eisenbahnzeitalter_Stuttgart_2014. Last accessed 05.09.2023.

20. Wolfson, L. Ya., Ledovskoy, V. I., Shilnikov, N. S. Transport Economics [Ekonomika transporta]. Moscow, Transzheldorizdat publ., 1941, 688 p.

21. Kochetov, I. V. Railway statistics [Zheleznodorozhnaya statistika]. Moscow, Transzheldorizdat publ., 1953, 304 p.

22. Mandrikov, M. E. Efficiency and ways to speed up cargo delivery [Effektivnost i puti uskoreniya dostavki gruzov]. Moscow, Transport publ., 1974, 88 p.

23. Chernigina, I. A. Economic assessment of cargo time delivery with railway transport in modern conditions. Ph.D. (Economics) thesis [Ekonomicheskaya otsenka vremeni dostavki gruzov na zheleznodorozhnom transporte v sovremennykh usloviyakh. Diss....kand.ekon.nauk]. Moscow, MIIT publ., 1991, 189 p.

24. Smirnov, S. V. Industrial Output in the USSR and Russia. Part 1. Reconstruction of Basic Time-series, 1861–2012. Voprosy Ekonomiki, 2013, Iss. 6, pp. 59–83. DOI: 10.32609/0042-8736-2013-6-59-83.

25. Fogel, R. W. Notes on the Social Saving Controversy. Journal of Economic History, 1979, Vol. 39, Iss. 1, pp. 1–55. [Electronic resource]: <https://www.jstor.org/stable/2118909>. Last accessed 20.11.2023.

26. Fogel, R. W. Railroads and American economic growth: essays in econometric history. John Hopkins University Press, 1964, 296 p. [Electronic resource]: <https://archive.org/details/railroadsamerica00foge/page/n7/mode/2up>. Last accessed 20.11.2023.

27. Lapidus, B. M., Macheret, D. A. Macroeconomic Aspect of the Evolution of Railway Transport. Voprosy Ekonomiki, 2011, Iss. 3, pp. 124–137. DOI: 10.32609/0042-8736-2011-3-124-137.

28. Grigoriev, L. M., Morozkina, A. K. Successful Unstable Industrialisation of the World: 1880–1913 [Uspeshnaya neustoichivaya industrializatsiya mira: 1880–1913]. Moscow, St. Petersburg, Nestor-History publ., 2021, 176 p. ISBN 978-5-4469-1912-3.



29. Khachaturov, T. S. Economics of transport [*Ekonomika transporta*]. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1959, 588 p.
30. Pivovarov, E. I., Arkhipova, T. G., Bokarev, Yu. P., Galieva, D. S. [et al]. History of railway transport in Russia, 19th–21st centuries [*Istoriya zheleznodorozhnogo transporta Rossii, XIX–XXI vv.*]. Ed. by E. I. Pivovarov. Moscow, Meshcheryakov Publishing House, 2012, 736 p. ISBN 978-5-91045-509-6.
31. Levin, D. Yu. Construction of the Great Siberian Route. *World of Transport and Transportation*, 2020, Vol. 18, Iss. 3 (88), pp. 190–213. DOI: 10.30932/1992-3252-2020-18-190-213.
32. Chuprov, A. I. From the past of Russian railways: articles 1874–1895 [*Isproshlogo russkikh zheleznykh dorog: statii 1874–1895 gg.*]. Moscow, Publishing house of M. and S. Sabashnikovs, 1909, 314 p.
33. Wolmar, C. To the Edge of the World. The Story of the Trans-Siberian Railway [Russian edition, transl. from English]. Moscow, Kuchkovo pole publ., 2016, 272 p. ISBN 978-5-9950-0669-5.
34. Levin, D. Yu. Gold Buckle of the Steel Belt of Russia. To the 120th Anniversary of the Circum-Baikal Railway. *World of Transport and Transportation*, 2021, Vol. 19, Iss. 1 (92), pp. 260–271. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-260-271.
35. Izmaykova, A. V. Economic assessment of innovation-oriented development of railway transport. Ph.D. (Economics) thesis [*Ekonomicheskaya otsenka innovatsionno-orientirovannogo razvitiya zheleznodorozhnogo transporta. Diss..kand.ekon.nauk*]. Moscow, MGUPS publ., 2016, 182 p.
36. Tsylin, P., Macheret, D., Kapustina, N. V. The Problem of Specific Railway Transport Resources Sharing. In: F. Gaol, N. Filimonova, & C. Acharya (Ed.), Impact of Disruptive Technologies on the Sharing Economy. IGI Global, 2021, pp. 13–27. DOI: 10.4018/978-1-7998-0361-4.ch002.
37. Kelly, K. The Inevitable. Understanding the 12 Technological Forces that will Shape Our Future. N.Y.: Penguin Books, 2017, 336 p. DOI: 10.1080/24751448.2017.1292803.
38. Shor, J. B., Walker, E. T., Lee, C. W. [et al]. On the Sharing Economy: sharing, caring and profit. *Contexts*, Winter 2015, Vol. 14, Iss. 1, pp. 12–19. DOI: 10.1177/1536504214567860.
39. Grudnikov, A. A., Makarova, E. A. On the issue of applying benchmarking in railway transport [*K voprosu o primeneni benchmarkinga na zheleznodorozhnom transporte*]. *Siberian Financial School*, 2015, Iss. 2 (109), pp. 78–80. EDN: TTMKQD.
40. Valeev, N. A. Positioning of railway transport in the transport services market [*Pozitsionirovanie zheleznodorozhnogo transporta na rynke transportnykh uslug*]. *Railway Economics*, 2023, Iss. 5, pp. 25–34. EDN: DAUYLM.
41. Phelps, E. Mass Flourishing: How Grassroots Innovation Created Jobs, Challenge, and Change. Princeton University Press, Princeton, NJ, 2013, xii + 378 pp. DOI: 10.1007/s11127-014-0166-2.
42. Levin, D. Yu. History of railway transport [*Istoriya zheleznodorozhnogo transporta*]. Rostov-on-Don, Phoenix publ., 2018, 414 p. ISBN 978-5-222-28294-6.
43. Razuvayev, A. D. Economic assessment of creation, evolution and strategic development of transport infrastructure (using railway transport as an example): Monograph [*Ekonomicheskaya otsenka sozdaniya, evolyutsii i strategicheskogo razvitiya transportnoi infrastruktury (na primere zheleznodorozhnogo transporta): Monografiya*]. Moscow, Prometheus publ., 2021, 286 p. ISBN 978-5-00172-251-9.
44. Razuvayev, A. D. The History of Development of Inland Transport Infrastructure: Technology and Economic Aspects. Part 2. *World of Transport and Transportation*, 2022, Vol. 20, Iss. 1 (98), pp. 106–112. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-1-12.
45. Mutanov, G. M., Esengalieva, Z. S. Method for assessing innovativeness and competitiveness of innovative projects. *Fundamental research*, 2012, Iss. 3–3, pp. 712–717. EDN: PAZBLH.
46. Sergeev, K. A., Kozlov, M. P., Koturanov, V. A. Indicators of innovative engineering solutions on designs of freight cars having numerical estimates. *Science and technology in transport*, 2012, Iss. 4, pp. 95–97. EDN: PIVONN.
47. Titova, T. S., Boronenko, Yu. P., Pokrovskaya, O. D. Evaluation of the innovativeness of new freight cars. *Transport of the Russian Federation*, 2022, Iss. 3 (100), pp. 23–28. EDN: IXUVOI.
48. Lukashev, V. I. Scientific and technological progress and economic efficiency of transport production (macroeconomic assessment) [*Nauchno-tehnicheskii progress i ekonomicheskaya effektivnost transportnogo proizvodstva (makroekonomicheskaya otsenka)*]. Moscow, Intekst publ., 2003, 351 p. ISBN 5-89277-048-6.
49. Shadur, L. A. Development of domestic wagon fleet [*Razvitie otechestvennogo vagonnogo parka*]. Moscow, Transport publ., 1988, 279 p. ISBN 5-277-00104-2.
50. Khusainov, F. I. Scientific and practical seminar «Economics of railway transport». *Railway Economics*, 2019, Iss. 3, pp. 73–76. EDN: YZRZJN.
51. Thery, E. Economic Transformation of Russia. Transl. from French. Moscow, ROSSPEN publ., 2008, 183 p. ISBN 978-5-8243-0985-0.
52. Davydov, M. A. Modernisation of Witte-Stolypin and its specificity. *Issues of economic theory*, 2017, Iss. 1 (1), pp. 109–131. EDN: YWIMYV.
53. Macheret, D. A. The Economy of the First Five-Year Plans in the «Mirror» of Railway Transport [*Ekonomika pervykh pyatiletok v «zerkale» zheleznodorozhnogo transporta*]. *Ekonomicheskaya politika*, 2015, Vol. 10, Iss. 4, pp. 87–112. DOI: 10.18288/1994-5124-2015-4-05.
54. Lapidus, B. M. Tasks of advanced development of Russian railways [*Zadachi operezhayushchego razvitiya Rossiiskikh zheleznykh dorog*]. *Zheleznodorozhnyi transport*, 2023, Iss. 2, pp. 4–14. EDN: HYHHML. ●

Information about the authors:

Macheret, Dmitry A., D.Sc. (Economics), Professor, Joint-Stock Company «Research Institute of Railway Transport» (JSC «NIIZhT»); First Deputy Chairman of Joint Scientific Council of JSC RZD; Professor at Russian University of Transport, Moscow, Russia, macheretda@rambler.ru

Kudryavtseva, Anastasia V. Ph.D. (Economics), Associate Professor, Research Fellow of Joint Scientific Council of JSC RZD, Associate Professor at Russian University of Transport, Moscow, Russia, anastasiya.izmaykova@mail.ru.

Article received 01.11.2023, approved 05.02.2024, accepted 15.04.2024.



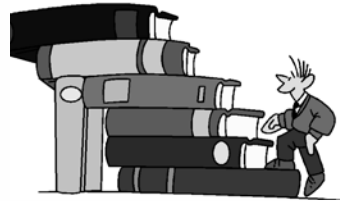
BOOK REVIEW

246

Applied analytics. Methodology for future and acting analysts.



BIBLIO-DIRECTIONS



SELECTED ABSTRACTS OF PH.D. THESES

249

- *Techniques for assessing the residual life of lithium-ion batteries on traction rolling stock.*
- *Interaction of external and traction power supply systems of 25 kV AC.*
- *Monitoring of soil erosion near railway bridge supports through natural vibration frequencies.*
- *Risk management in the logistics system of railway cargo transportation.*

NEW BOOKS

252

Newly published textbooks and monographs on transport and transportation.





Professional Analyst Training: Challenging Questions, Not Easy Answers



Vasily P. KUPRIYANOVSKY

Vasily P. Kupriyanovsky

Russian University of Transport, Moscow, Russia.

✉ v.kupriyanovsky@rut.digital

ABSTRACT

Ponkin, I. V. *Methodology of Scientific Research and Practical Analytics. A Textbook. 5th edition revised and expanded. In two volumes. Vol. 1: Practical Analytics (The Art of Analytical Thinking and Analytical Work). Consortium «Analytics. Law. Digital». Moscow, Buki Vedi publ., 2024, 720 p. (Series: «Research Methodology and Ontology»). ISBN 978-5-4465-4179-9.*

The textbook of an advanced level is devoted to the thematic horizon of the theory and methodology of applied analytics. It explains the concept, essence, nature, ontology of applied analytics (as a kind of specific mental activity and as its product), its functional-specific and sectoral diversity, describes and elaborates on methods, technologies and tools of applied analytics, concepts and schemes put in the foundation of its organisation and implementation.

The textbook that has been successfully tested for different audiences and groups describes criteria for evaluating analytical processes and products.

The edition is intended for professional analysts (of various industries and directions), analytics professors, managers and employees of scientific organisations and departments, applied analytical products customers, applicants for academic degrees and their scientific consultants / supervisors, researchers and faculty of educational organisations, as well as for all those interested in this topic.

The author of the book review offers some reflections on the first volume of the fifth edition of the «Methodology of Scientific Research and Applied Analytics» by I. V. Ponkin and the illustrated appendix to it, raises challenging issues of professional analysts training.

Keywords: applied analytics, science, training of practical analysts, think tanks, advantage in analytical support.

To radically improve the quality of intellectual training (both scientific and applied analytical), to go to the operational space of high professional analytics, to overcome the huge gap between highly professional experience and total inexperience, between unknown theory and timid practices in applied analytics – these are the critically important tasks facing today the entire system of public administration, but are just as relevant for engineering training, training of lawyers, economists, managers. Alas, there is almost no teaching aids to teach intellectual work, the skill and art of analytical thinking and analytical work.

The striking and deservedly marked exception here is the textbook «Methodology of Scientific Research and Practical

Analytics» by Igor V. Ponkin, LL.D, Professor (Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (RANEPA), Kutafin Moscow State Law University). The work has already withstood several editions. The textbook can be safely called a tool that develops the intellect and abilities of management, intended for scientific researchers and applied analysts, heads of specialised departments.

The author of the review, to be honest, has already published his feedback [1] to the third (one-volume) edition of this textbook [5], and therefore could not miss the edition of the new first volume of the two-volume textbook «Methodology of Scientific Research and Practical Analytics» authored by I.V. Ponkin [2] (the second volume in the previously appeared 4th edition was

For citation: Kupriyanovsky, V. P. Professional Analyst Training: Challenging Questions, Not Easy Answers. World of Transport and Transportation, 2024, Vol. 22, Iss. 4 (113), pp. 246–248. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-15>.

The original text of the article in Russian is published in the first part of the issue.

Текст статьи на русском языке публикуется в первой части данного выпуска.

co-authored with A. I. Lapteva [4]; within the fifth edition, according to the authors, the second volume is expected only in 2025) and an illustrated appendix to this two-volume edition – a kind of «zero» volume [3].

The textbook is based on the expert knowledge and reflections accumulated by many other researchers and analysts, systematised and fundamentally presented by I. V. Ponkin, but also on his own vast experience in conducting expert work, participating in scientific research and in expert support of public administration. These publications are written by a science and analytics professional for science and analytics professionals. Five Doctors of Law who defended their doctoral theses under his scientific supervision (consulting) are already quite a convincing milestone for recognition of the level of professionalism, as well as the volume of his publications – more than 900 works translated into 10 different languages.

Educational, methodical and instructive literature, which I. V. Ponkin seeks to create on the subject of the methodology of scientific research and applied analytics, is devoted to technologies, methods, tools, practices, «life hacks» of professional research, educational, analytical work, creating starting points for high-level discussions for high-class scientists, researchers and applied analysts and is filled with this kind of texts.

Such publications have already become (and the trend will only be increasingly fixed and expanded) a step towards the creation of highly professional literature on the basic doctrine and methodology, useful both for educational activities and for professional research work – both research and development, and applied analytical works.

And it must be said that Professor Ponkin's aspirations to create a comprehensive and universal, but most importantly, effective system of «wrapping one's head around it», as he likes to say, are indeed able to find and do really find a positive response not only among legal scholars and practitioners of legal analytics (which is evidenced by dozens of reviews of various editions of this extensive and ambitious work).

These aspirations are of interest to specialists in technical and economic areas in science and applied analytics, finding consistent interest and disciples in these areas, causing intellectual ferment and discussions at various levels.

The distinctive feature of all editions of the «Methodology...» of I. V. Ponkin (partly in co-authorship with A. I. Lapteva) is the focus on applied issues, although developed each time by introduction of the relevant theoretical basis, «sublimated substrates» of knowledge and instructional materials. There are absolutely no showdowns and disputes with anyone, and there is not the slightest hint of politicisation or ideologization of arguments and recommendations. There is a powerful multi-level «fragmentation» of the presented thematic areas into multi-level hierarchical rows of compact condensed blocks that set out and reveal «simple» technological issues.

Let us briefly consider the contents of the first volume.

The introduction defines the classical familiarisation with the topic, sets out the author's intention and concept, the goals of the textbook and its paradigmatic foundations, shows in which discussions the previous editions of the textbook were reflected.

The first chapter «Concept, Ontology and General Theory of Practical Analytics» contains 13 paragraphs and reveals the thematic areas: the concept, nature and ontology of applied analytics; species diversity of applied analytics; who is an analyst; a line of roles of a practitioner-analyst; what constitutes aerobatics in applied analytics; the proper scope of qualification of the chief analyst (head of the analytical department); the concept, foundations, framework and content of the general theory of applied analytics; correlation of factography and applied analytics; correlation of jurisprudence of law-making and applied analytics; a brief substrate summary of the methodology of applied analytics (§ 1.10 is the largest paragraph of the first chapter, so brevity is relative here); the concept and meaning of intuition in applied analytics; differences between

the expert opinion of a practitioner-analyst and other types of writing or other presentation of considerations; the concept and meaning of visualisation of the process and results of applied analytics.

The second chapter is devoted to specific instrumental and functional segments of applied analytics and includes six paragraphs, revealing the following thematic areas: the concept and features of predictive applied analytics; prescriptive applied analytics; the concept and features of descriptive applied analytics; the concept and features of intellectualised applied analytics and pragmatic applied analytics; the concept and features of diagnostic (deviological) applied analytics, features of operating anomalies in applied analytics; the concept and features of «postmortem» applied analytics.

The third chapter is devoted to the training and qualification of practitioners-analysts, contains eight paragraphs, revealing the thematic areas: the importance and features of the training of practitioners-analysts; understanding of what is due in the purposeful formation of a professional practitioner-analyst; description of some of the most non-trivial and noteworthy training methods in applied analytics; features of training analysts in foreign special services; ways of forming the abilities and skills of critical thinking in practitioners-analysts; the concept and measure of the proper skill and art of the practitioner-analyst to ask questions; standards of good applied analytical craft, craftsmanship and art; presentation of a formalised list of relevant knowledge, skills, competencies and abilities of a practitioner-analyst.

The fourth chapter sets out the evaluation tools – criteria and parameters of applied analytics, consists of 13 paragraphs: distinctive (essential) and descriptive parameters of applied analytics; analytical accuracy; complexity in applied analytics; analytical fluency; analytical flexibility; analytical insight; brevity and simplicity in applied analytics; metacognitive distancing in applied analytics; evaluative and interpretative certainty in applied analytics; consistency of applied analytics; analytical maturity; analytical perseverance or grasp; analytical scepticisms.

The fifth chapter sets out specific technologies and techniques of applied analytical work, covering a wide variety of them in 22 paragraphs: general introduction to the topic; data search in applied analytics; analytical vision in the development of the material under study; analytical markup of the studied textual material; focusing in applied analytics; crystallisation of ideas and conclusions in applied analytics; creation of valuable ideas in applied analytics; applied analytical synthesis from small fragments; analytical enrichment of data and analytical enrichment of an applied analytical product; the key issue of the pre-final preparation of the applied analytical product about the missed essential points; the concept and techniques of applied analytical writing; the concept and meaning of the idea and ingenuity; non-linearity of the process of working on an applied analytical product; cyclicity in applied analytics; the concept, requirements and technologies for preparing an analytical report; ontology as a tool for applied analytics; the concept and features of analytical reading of a text; the operation of images in analytics; transition to the meta-level in analytics; nonlinear thinking and linear thinking in applied analytics; the first steps in the creation of a research product; the use of generative pretrained transformers of texts in natural language (*Chat GPT*) in applied analytics.

The sixth chapter sets out 32 general analytical methods and respectively includes 32 paragraphs, and among them paragraphs on intuitive analytics methods; analytical framing, folding, unfolding, contrast methods; methods of explicit-structured, implicit-structured, and descriptive-explicative theorising; methods of flow analytics; method of simplification of ontologised images of scientific or analytical constructs; method of scenario modelling; SWOT analysis method; analytical method of dissenting opinion in a group; analytical method of moving back from the final point; analytical method



of transfer; analytical method of complicating the task; dashboard method; analytical method of the «fish skeleton»; method of the tree of current reality; colour coding method; method of association mapping; tagging method; method of constructing a cause-and-effect matrix; the failure tree method; analytical listening method; methods of bibliometric analytics; analytical pyramid method; method of reference points; method of operating with competing hypotheses; Bayesian approach; method of analytical operation with core factors; methods of brainstorming and synectics; method of situational and logical analysis; method of morphological analysis.

The seventh chapter sets out in five paragraphs the theory and practice of applied analytics deviantology: a general introduction to the topic; defects in applied analytics and deviantology of applied analytics; the importance of methodology for operating defects in applied analytics; cognitive biases as a source of defects in applied analytical products; cognitive vulnerabilities of the practitioner-analyst.

The eighth chapter is devoted to collectively produced analytics, think tanks (analytical centres), and includes eight paragraphs: awareness in the subject-object domain (domain awareness) and superiority in such awareness; situational awareness and superiority in situational awareness; general operational picture in applied analytics; analytical coherence of the analytical department; analytics factories; situational and analytical centres.

The ninth chapter is devoted to the specialised subject-object areas (directions) of applied analytics, including legal analytics, engineering analytics, and business analytics.

Each paragraph in most cases is divided into subparagraphs, which, in turn, have a greater independent value. Altogether (that is in the volume), hundreds and hundreds of important and complex questions are explained.

The contents of the textbook are summarised in the conclusion.

When reviewing the work, it is impossible to ignore the aspect that this is one of the first publications in the country illustrated with the help of generative artificial intelligence technologies.

True, some of the images are human made, but there are illustrations in the work generated by a machine under the prompt control of I. V. Ponkin. The author operates with complex visual images with powerful cognitive-stimulating content, proving through his own example, among other things, the canonical position about the value of visualisation in applied analytics.

This is an especially crucial point, especially since we live in the conditions of widespread memo-clip thinking, and this should be considered when developing textbooks and programs.

Ice balls frozen in an icy transparent cube (P. 37) – as a figurative representation of a composite analytical product; an assembled wooden puzzle of a strict cube consisting of complex spatial details that figuratively reflect the importance of the organic, integrative integrity of the analytical report (P. 429), a series of illustrations using the effect of complex spatial combinations of steel balls and steel cables (pp. 35, 158, 600), complex spatial combinations of cubes (pp. 34, 72, 622, 623, 630, 655, 668); «a candle that does not give a flame, but emits a turbulent stream of water» – as «a figurative reflection of inadequacy and fantasy, obvious anomalousness of the recorded data or the obtained defective analytical result» (P. 146); «figurative representation of burning water ice (in the absence

of chemical tricks)» (P. 222) and much more will certainly help the reader to visualise the main points of the textbook.

Also, with such illustrative support of the two-volume (plus the zero volume) edition, I. V. Ponkin achieves another important goal – to expand the circle of those interested in the topic far beyond the narrow circle of high-class professional analysts.

Of the obvious shortcomings of the fifth edition of the first volume (on practical analytics), one could point out the unacceptably small volume of immensely popular thematic sections – on engineering analytics (two pages), business analytics (two pages).

Another drawback of the fifth edition of the first volume (as well as of the second volume in the previous, fourth, edition) is the absence of control tasks, task books after the chapters. Although, perhaps, given the scale of the work, such a task book, a collection of tasks should be made a separate volume.

As for the illustrated introduction to practical analytics, here we would rather recommend issuing a similar illustrated introduction to research work, which would be logical, based on the idea of the two-volume work.

However, talking about «flawlessness» is not the best way to evaluate instructional work in science and applied analytics, and both publications are objectively beyond praise.

In this case, we can even talk about the emergence of a new class of highly intellectual analytical literature in the country. It is unlikely that Igor Ponkin and his co-author Alena Lapteva can be considered the founders or the central element of such literature (there are more famous and prolific authors), but the fact that the «Methodology of Scientific Research and Practical Analytics» rightfully occupies the «best shelf» in this volume is indisputable. This is a more than worthy contribution.

REFERENCES

1. Kupriyanovsky, V. P. Teaching and learning the science. *Law and State: The Theory and Practice*, 2022, Iss. 8, pp. 178–179. EDN: EFMMTU. DOI: 10.47643/1815-1337_2022_8_178.
2. Ponkin, I. V. Methodology of Scientific Research and Practical Analytics. A Textbook. 5th edition revised and expanded. In two volumes. Vol. 1: Practical Analytics (The Art of Analytical Thinking and Analytical Work). Consortium «Analytics. Law. Digital». Moscow, Buki Vedi publ., 2024, 720 p. (Series: «Research Methodology and Ontology»). ISBN 978-5-4465-4179-9. [Electronic resource]: https://moscou-ecole.ru/ponkin_methodology_5_1_practical-analytics/.
3. Ponkin, I. V. Illustrated introduction to practical analytics. Appendix to the textbook «Methodology of Scientific Research and Practical Analytics». Consortium «Analytics. Law. Digital». Moscow, Buki Vedi publ., 2024, 88 p. [Electronic resource]: <https://moscou-ecole.ru/2024/04/02/analyst-training/>.
4. Ponkin, I. V., Lapteva, A. I. Methodology of Scientific Research and Practical Analytics. A Textbook. 4th edition revised and expanded. In two volumes. Vol. 2: Scientific Research. Consortium «Analytics. Law. Digital». Moscow, Buki Vedi publ., 2023, 640 p. [Electronic resource]: https://moscou-ecole.ru/2023/06/29/methodology_4-2_2023/.
5. Ponkin, I. V., Lapteva, A. I. Methodology of Scientific Research and Practical Analytics. A Textbook. 3rd edition revised and expanded. Consortium «Analytics. Law. Digital». Moscow, Buki Vedi publ., 2022, 754 p. [Electronic resource]: https://moscou-ecole.ru/2022/03/31/methodology_research_analytics_3_ed/.

Information about the author:

Kupriyanovsky, Vasily P., Deputy Director of the Research and Educational Centre «Digital high-speed transport systems» of the Advanced Engineering School «HSR Academy», Russian University of Transport, Moscow, Russia, v.kupriyanovsky@rut.digital.

Article received 28.08.2024, accepted 10.09.2024.

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-16>

Borisov, P. V. Techniques for assessing the residual life of lithium-ion batteries of traction rolling stock. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Metodika otsenki ostatochnogo resursa litii-ionnykh akkumulyatornykh batarei tyagovogo podvizhnogo sostava. Avtoref. dis...kand.tekh. nauk]. St. Petersburg, PGUPS publ., 2024, 15 p.

The use of independent energy sources on traction rolling stock, such as lithium-ion battery storage units, makes it possible to use both hybrid traction technology, which helps reduce the load during peak operating modes of the diesel generator and hydrogen proton-membrane power plants, and completely autonomous traction using batteries.

The use of alternative energy sources used for traction rolling stock on the railway network of the Russian Federation is increasingly developing. The task of introducing these types of energy sources on shunting, suburban and other locomotives has not been fully resolved, since there is a problem of the limited life of the battery storage unit. Traction rolling stock equipped with a battery storage unit as the main one energy source requires limited operating modes.

Increasing the efficiency of the «diesel generator – energy storage» system allows to increase the service life, as well as reduce the costs of premature replacement or unscheduled repair of the diesel generator. This fact is the key to successful implementation of plans for operation of shunting locomotives of the TEM9N and TEM5X series, as well as of transition of shunting traction to autonomous one due to the use of EMKA2 locomotives.

The reasons influencing the reduction of the service life of lithium-ion batteries of traction rolling stock (LIAB TRS), manifested in a decrease in the total capacity, were studied.

The equivalent circuit related to LIAB TRS was studied and its parameters were determined with subsequent verification on a model with the values obtained during an experiment.

The characteristics of the internal resistance of LIAB TRS suitable for operation were studied, the relationship between the increase in the value of the total resistance Z and its service life was obtained. The criteria for rejecting LIAB in operation were determined based on the parameters of the equivalent circuit of LIAB.

Proposals have been developed for organising the monitoring of LIAB TRS residual service life using functional diagnostics tools under current operating conditions, which will allow monitoring the current state and predicting the reduction of service life of LIAB without performing maintenance and current repair of the traction storage unit.

Based on the developed proposals for monitoring LIAB TRS service life, algorithms for software diagnostics of LIAB storage unit for TRS have been built.

Software has been developed for the control system of the energy converter operating with LIAB TRS, for which an author's certificate of state registration of the computer program No. 2023681901 has been received.

A traction calculation has been made for an experimental locomotive for shunting work, equipped with LIAB. The capacity of LIAB has been determined for the specified operating mode of TRS within a marshalling yard. The service life of the resulting traction storage unit has been determined, confirmed by experimental studies.

As recommendations and prospects for further development in this direction, it may be proposed to test the proposed methodology on different types of electric energy storage devices, as well as to develop a hardware on-board automated diagnostic complex, implemented in a traction storage device, which collects, stores and analyses information.

2.9.3 – Rolling stock of railways, train traction and electrification.

The work was performed and defended at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University.

Kovalev, V. A. Improving the efficiency of interaction of external and traction power supply systems of 25 kV alternating current. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Povyshenie effektivnosti vzaimodeistviya system vneshnego



i tyagovogo elektrosnabzheniya peremennogo toka 25 kV. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. Khabarovsk, FESTU publ., 2024, 24 p.

As part of the implementation of the Transport Strategy of the Russian Federation, the goal has been set to increase the transit capacity of the Eastern part of railway network. The most important task is the elimination of «bottlenecks» on the transport network of railways, which limit the increase in the speed and weight standards of trains. As one of the mechanisms for eliminating «bottlenecks», the Strategy provides for reconstruction and modernisation of traction power supply systems.

The thesis examines the issues of increasing the efficiency of interaction between external (hereinafter – EPS) and traction (hereinafter – TPS) AC 25 kV power supply systems to fulfil the tasks formulated by the programs for the strategic development of railways.

An analysis of the interaction indicators of external and traction power supply systems of 25 kV alternating current was performed using the example of the Far Eastern Railway's TPS. The connection of traction substations to the 25 kV alternating current TPS using the «feeding» circuit creates a «bottleneck» for increasing the weight of trains and reducing the intervals of passing trains.

The mathematical model for calculating the distribution of traction load currents of electric rolling stock in the windings of traction transformers and phases of the power transmission lines of the external power supply system is specified by the temporary input resistances of the nodes of connection of traction substations to the power transmission lines developed in the thesis study.

An algorithm and automated workstation for determining the temporary input and mutual resistances of the nodes of connection of traction substations to the power transmission lines of EPS have been developed.

A database of power transmission lines, power transformers and automatic transformers of EPS substations feeding the Far Eastern Railway TPS has been developed.

An algorithm has been developed for determining the number of time intervals, selecting power supply circuits for predicted traction loads in the considered period considering the minimisation of dispersion and rational consumption of the resource of switching devices and voltage regulation devices of traction substations. The algorithm was implemented with a computer program.

The obtained results prove that computer modelling of the normalisation of traction load power supply circuits and connection of traction substations to power transmission lines and traction network increases the efficiency of interaction between traction and external power supply systems.

2.9.3. Rolling stock of railways, train traction and electrification.

The work was performed and defended at the Far Eastern State Transport University.

Polyakova, L. A. Monitoring of soil erosion near railway bridge supports through natural vibration frequencies. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Monitoring razmyvov grunta i opor zheleznodorozhnykh mostov po chastotam sobstvennykh kolebaniy. Avtoref. dis...kand.tekhn. nauk]. Novosibirsk, STU publ., 2024, 24 p.

The safety of bridge structures during operation must be ensured by conducting periodic inspections, control checks and monitoring of the condition of structures. When controlling structures, the operational dependability of transport structures is assessed, and recommendations are given for eliminating the identified defects. Defects affecting the safety of the structure can emerge in places that are difficult to access for inspection (for example, in the underwater part of the supports and in the underbridge channel). One of such defects is soil washout near the channel supports of the bridge.

When designing a bridge crossing, the maximum depth of soil erosion near the support is calculated and the required deepening of the support foundation base into the ground is determined. But these measures are often insufficient for the safe operation of the bridge. This is primarily due to the fact that the calculated characteristics of the water flow during the period of operation of the structure can change significantly compared to the values adopted at the time of design. These changes are associated with climate change, as well as with the initially calculated possible probability of exceeding the characteristics of the water flow. There are also practical cases when the rock foundation at the support, initially considered non subject to erosion, is washed away. This is due to the peculiarity of a particular rocky soil, which, when its natural structure is disturbed (the construction of the foundation of the supports), is destroyed up to the soil subject to erosion. Based on this, periodic monitoring of soil erosion at the supports is

necessary to ensure the reliability of the bridge structure.

The relevance of the study is due to the lack of a scientifically based method for the prompt diagnosis and monitoring of soil erosion at channel supports. And the fact that the free length of the support changes with the development of erosion allowed us to put forward a hypothesis about the dependence of the frequency of natural oscillations of a natural-technogenic system consisting of a support, foundation soil and superstructures resting on the supports, on the amount of soil erosion at the support.

In-kind measurements of natural oscillation frequencies of natural-technogenic systems consisting of supports, foundation soil and superstructures resting on the supports were carried out with different structural designs of the elements and the actual soil level at the supports. As a result, experimental qualitative and quantitative dependencies of natural oscillation frequencies of natural-technogenic systems of different structural designs on the soil erosion depth at the supports were established.

The calculation assumptions were substantiated when determining the natural oscillation frequency of a support considering its joint operation with the span structures resting on it and the foundation soil. Thus, the mathematical model for determining the natural oscillation frequencies of natural-technogenic systems with different foundation depths was refined, describing the interaction of the support and the superstructures resting on it, by considering the specific operation of the supporting parts during free oscillations. Calculated dependencies of natural oscillation frequencies of natural-technogenic systems on the soil erosion depth at the supports were obtained. The compliance of the accepted design assumptions with the actual operation of the structure is confirmed by comparing the obtained frequencies with the results of in-kind measurements for 35 operated supports.

An algorithm has been developed for monitoring the depth of soil erosion at the supports of railway bridges based on the frequencies of natural oscillations, which allows for timely detection of support erosions and monitoring their depth.

The prospects for further research include studies of the dynamic operation of various natural and man-made systems, considering the design features of the bridge structure and the mass of water involved in the oscillatory process.

2.1.8—Design and construction of roads, metro, airfields, bridges and transport tunnels (engineering sciences).

The work was performed and defended at the Siberian Transport University.

Umanets, V. V. Risk management in the logistics system of railway cargo transportation. Abstract of Ph.D. (Eng) thesis [Upravlenie riskami v logisticheskoi sisteme gruzovtkh zheleznodorozhnykh perevozok. Avtoref. dis... kand. tekhn. nauk]. St. Petersburg, PGUPS publ, 2024, 17 p.

The objective of the study is to develop methodological provisions for managing the risks of railway cargo transportation arising in logistics transport systems under the conditions of a deficit in the transit capacity of the railway infrastructure and associated with violations of cargo delivery times, failures of technical means (TMF) and actions of third-party organisations.

The need to synchronise the risk management system with the methods of analysis and forecasting of railway cargo transportation, especially in key areas, is substantiated. The formalisation of transport and logistics risks arising under the influence of many factors, including constraints on investment development of infrastructure, tariff restrictions and growth of operating costs related to its maintenance and repair, has been completed.

It has been proven that the existing system for analysing cargo transportation does not fully consider the problems of the state and development of the railway infrastructure, which does not allow for a prompt and flexible response to changes in the structure of cargo flows and the dynamics of transportation. As a solution to the problem, an algorithm for forecasting the volume of cargo transportation is proposed, which makes it possible to clarify changes in the volumes and structure of cargo in accordance with the transit capacity of the infrastructure.

A concept for analysing railway cargo transportation has been developed, considering the risks of infrastructure constraints. The concept of risks of transit capacity constraints regarding railway infrastructure has been expanded.

The semantic modelling method was used to systematise, structure and rank the risks of violation of cargo delivery deadlines and risk owners, and perform quantitative assessment of risks by the sources of their generation. It is shown that the



proposed calculation allows to increase the reliability of assessment of the risks of limiting the transit capacity of the railway infrastructure, considering the frequency of their occurrence and the significance of the impact on the delivery times of goods.

A methodology for managing the risks regarding the transit capacity of the railway infrastructure based on semantic modelling was developed and

tested. A software product was developed in the JAVA programming language, the use of which can be useful in the risk management system of logistics transport systems of other modes of transport.

2.9.9. – Logistics transport systems.

The work was performed and defended at Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University. ●

NEW BOOKS ON TRANSPORT AND TRANSPORTATION

The list of original titles in Russian is published in the first part of the issue

Список на русском языке публикуется в первой части данного выпуска

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2024-22-4-17>

Ashikhmin, S. A., Ashikhmina, E. A. Car Structure. Textbook [Ustroystvo avtomobilei: Uchebnik]. 2nd ed., ster. Moscow, Academia publ., 2024, 318 p. ISBN 978-5-0054-1682-7.

Friedman, A. M. Finances of organisations. Practical course: Study guide [Finansy organizatsii. Praktikum: Ucheb. posobie]. Moscow, RIOR: INFRA-M publ., 2024, 249 p. ISBN 978-5-369-01950-4.

Grechanik, A. V., Zamukhovskiy, A. V., Semenov, E. V. Design and calculation of the ordinary simple switch. Training and methodological guide [Proektirovanie i raschet rel'zovoi kolei: Uchebno-metod. posobie]. Moscow, Pero publ., 2024, 58 p. ISBN 978-5-00244-214-0.

Gruntovich, Nik. V., Gruntovich, Nad. V. Technical diagnostics of electrical equipment: Textbook [Tekhnicheskaya diagnostika elektrooborudovaniya: Uchebnik]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 253 p. ISBN 978-5-16-017836-3.

Gulevich, A. N., Matkovsky, V. V., Soshkin, P. A. Explosive and fire safety of the ship. Study guide [Vzryvopozharobezopasnost korablya: Ucheb. posobie]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 223 p. ISBN 978-5-16-018739-6.

Gumerov, A. F., Skhirtladze, A. G., Grechishnikov, V. A. [et al.] Quality management in mechanical engineering. Study guide [Upravlenie kachestvom v mashinostroenii: Ucheb. posobie]. Stary Oskol, TNT publ., 2024, 167 p. ISBN 978-5-94178-172-0.

Isaev, R. A. Operational risk management: reliability of business processes and IT systems. Practical manual [Upravlenie operatsionnymi riskami: nadezhnost biznes-protsessov i IT-sistem: Prakt. posobie]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 152 p. ISBN 978-5-16-019573-5.

Katin, V. D., Kosygin, V. Yu., Zhuravlev, A. A. Study of noise of burners and other devices at oil refining and heat power engineering facilities and enterprises and development of methods for its reduction. Monograph [Issledovanie shuma gorelok i drugih ustroystv na obektakh i predpriyatiyakh neftepererabotki i teploenergetiki i razrabotka metodov ego snizheniya: Monografiya]. Khabarovsk, Publishing house of Pacific State University, 2024, 161 p. ISBN 978-5-7389-3824-5.

Klimova, G. N. Electric power systems and networks. Energy saving. Study guide [Elektroenergeticheskie sistemy i seti. Energoberezhenie: Ucheb. posobie]. 2nd ed. Moscow, Yurait publ., 2024, 179 p. ISBN 978-5-534-18321-4.

Krotenko, T. Yu., Sundukova, G. M. Engineering and economic education: transformation and development of the modern space for training managers. Monograph [Inzhenerno-ekonomicheskoe obrazovanie: transformatsiya i razvitie sovremennogo prostranstva podgotovki upravlentsev: Monografiya]. Kursk, Universitetskaya kniga publ., 2024, 306 p. ISBN 978-5-907857-81-0.

Kuznetsov, V. V., Polskiy, E. V., Pechenka, S. N. Operation of ship boiler houses and steam generating units. Study guide [Eksploatatsiya sudovykh kotelnykh i paroproizvodnyashchikh ustanovok: Uchebnoe posobie]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 134 p. ISBN 978-5-16-017930-8.

Romanov, E. N. Ship refrigeration units and their operation. Reference materials. Training and methodological guide [Sudovie kholodilnye ustanovki i ikh eksploatatsiya: spravochnie materialy: Uchebno-metod. posobie]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 226 p. ISBN 978-5-16-018446-3.

Sekirnikov, V. E. Labour protection at motor transport enterprises. Textbook [Okhrana truda na predpriyatiyakh avtotransporta: Uchebnik]. 5th ed., ster. Moscow, Academia publ., 2024, 203 p. ISBN 978-5-0054-1712-1.

Smirnov, A. Yu. Electromechanics. Fundamentals of the theory and computational analysis of electrical machines. Study guide [Osnovy teorii i vychislitelnyy analiz elektricheskikh mashin: Ucheb. posobie]. 2nd ed., rev. and enl. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 348 p. ISBN 978-5-16-016661-2 (print).

Sokolov, Yu. I., Lavrov I. M., Ishkhanyan, M. V. Fundamentals of the economy of the transport complex. Study guide [Osnovy ekonomiki transportnogo kompleksa: Ucheb. posobie]. Moscow, RUT (MIIT) publ., 2024, 165 p. ISBN 978-5-7876-0291-3.

Stoyanova, M. V. Study of technologies and markets. Study guide [Issledovaniya tekhnologii i rynkov: Ucheb. posobie]. Moscow, Publishing house of Bauman Moscow State Technical University, 2024, 125 p. ISBN 978-5-7038-6189-9.

Syaglova, Yu. V., Maslevich, T. P., Safronova, N. B. Business Management in the Digital Economy. Textbook [Upravlenie biznesom v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki: Uchebnik]. Moscow, Dashkov i K ° publ., 2024, 319 p. ISBN 978-5-394-05804-2.

Zintsov, A. N. Operation of Cars and Tractors: Control, Diagnostic and Adjustment Work. Practical course: Study guide [Eksploatatsiya avtomobilei i traktorov: kontrolno-diyagnosticheskie i regulirovochnie raboty. Praktikum: Ucheb. posobie]. Moscow, INFRA-M publ., 2024, 276 p. ISBN 978-5-16-017980-3.

Compiled by N. OLEYNIK ●



The 50th Anniversary of the start of the construction of the Baikal–Amur Mainline

Tynda became the meeting point for relay trains from Khabarovsk and Irkutsk, symbolising the docking of the “golden” link of the BAM. The event was to honour the 50th Anniversary of the start of the construction of the BAM. More than 600 veterans and honoured guests travelled with those trains to Tynda. In total, more than 2 thousand guests from all over the country and the former republics of the Soviet Union gathered in the capital of the BAM to meet again and remember how they paved the way through the endless taiga, rivers and mountain ranges of Siberia and the Far East half a century ago.

The same day, a monument to the builders of the mainline was opened. The composition, cast in bronze, is installed on a granite pedestal. On both sides of the sculpture there are scenes from the life of BAM residents and the route of the legendary railway. The author of the monument is Salavat Shcherbakov.

July 8 marks one of the main days in the history of the BAM. Despite the fact that by the summer of 1974 work on the railway had already been in full swing, and many Komsomol members had been working there, the Decree of the Central Committee of the CPSU and the Council of Ministers of the USSR No 561 “On the construction of the Baikal-Amur Mainline” dated July 8, 1974 determined the stages and terms of construction, the amount of unprecedented project funding.

BAM has become home to numerous records. The total length of the railroad is 4287 km, it passes through Eastern Siberia and the Far East to the Pacific Ocean. It also crosses the territory of two republics (Buryatia and Yakutia), Khabarovsk and Transbaikalia, Irkutsk and Amur regions, passes through 7 mountain ranges and 11 crosses full-flowing rivers (including Lena, Vitim, Olekma, Amur, Zeya, Selemdzha, Bureya).

About 130 thousand Soviet citizens were employed in the construction of tracks during the peak period of construction, and over 2 million people took part in the

construction of the Baikal-Amur Mainline in total, including representatives of 13 republics of the USSR and 22 autonomies of the RSFSR.

The work took place in difficult climatic and geological conditions, which required a huge contribution from all the sectors, but above all from those people who were directly involved in the construction. The builders of the Baikal-Amur Mainline solved the problem of the national level, opened access to the natural resources of a huge region, built the shortest intercontinental railway East-West route and strengthened the military-strategic position of the country.

It is symbolic that on the occasion of the 40th anniversary of the Baikal-Amur Mainline, on July 8, 2014, President of the Russian Federation Vladimir Putin gave an official start to BAM-2, the largest modern construction project in the Eastern part of the national railway network. The BAM expansion project is aimed at increasing Russia’s transport connectivity with the countries of the Asia-Pacific region and improving the conditions for the socio-economic development of the Far East.

In 2024, on the commission of the President, the third stage of the investment project to modernise the railway infrastructure of the Baikal-Amur Mainline and the Trans-Siberian Railway until 2035 was approved. Within the framework of the project, a fundamentally new quality railway infrastructure is being created with the involvement of the most advanced technical and technological solutions. In the context of increased demand for cargo transportation in the eastern direction, the development of the Baikal-Amur Mainline and the Trans-Siberian Railway is one of the key national tasks.

Compiled based on the news of the media centre of the Ministry of Transport of the Russian Federation:

<https://mintrans.gov.ru/press-center/news/11342> ●



**World of Transport
and Transportation**

Vol. 22, Iss. 4, 2024

Editor-in-Chief

Igor N. Rozenberg

For your letters:

Russian University of Transport,
World of Transport and
Transportation Journal,
9, str. 9, Obraztsova ul.,
Moscow, 127994, Russia.
e-mail: mirtr@mail.ru

Почтовый адрес редакции:

127994, Москва,

ул. Образцова, д. 9, стр. 9.

Российский университет
транспорта,

Издательство «Транспорт РУТ»

Тел.: + 7(495)2740274 доб. 3004

e-mail: mirtr@mail.ru



ISSN 1992-3252



9 771992 325778 >